

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ  
КАФЕДРА ПРОМИСЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_  
(підпис) Ю.С. Ямненко  
(ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності \_\_\_\_\_  
171 Електроніка  
(код і назва)

спеціалізації \_\_\_\_\_  
Електронні компоненти і системи

на тему: \_\_\_\_\_  
Аналізатор параметрів якості електроенергії

Виконав : студент \_\_\_\_\_  
II курсу, групи \_\_\_\_\_  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ Ходаков Костянтин Анатолійович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник \_\_\_\_\_  
доц., к.т.н., Вербицький Є.В. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_  
1-4 \_\_\_\_\_ доц., к.т.н., Вербицький Є.В. \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
зав. каф. ЕІ, професор, д.т.н., Тимофєєв В. І. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет електроніки

( повна назва )

Кафедра промислової електроніки

( повна назва )

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо - професійною програмою

Спеціальність 171 Електроніка

(шифр і назва)

Спеціалізація Електронні компоненти і системи

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

Ю.С. Ямненко  
( підпис ) ( прізвище ініціали )

«        »                      2018 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ**

Ходаков Костянтин Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Аналізатор параметрів якості електроенергії

науковий керівник дисертації Вербицький Євген Володимирович, к.т.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « 07 » листопада 2018 року № 4114-с

2. Строк подання студентом дисертації 6-го грудня 2018 року

3. Об'єкт дослідження: методи покращення параметрів якості електричної енергії в мережах

4. Предмет дослідження методика вибору типу та потужності компенсатора для досягнення максимального економічного ефекту та регламентованих величин параметрів якості електроенергії

5. Перелік завдань, які потрібно розробити огляд аналізаторів параметрів якості електроенергії та компенсаторів реактивної потужності, методика вибору типу та потужності компенсатора, розробка аналізатора параметрів якості електроенергії, розроблення стартап – проекту

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Схема електрична структурна, схема електрична принципова, слайди презентації

## 7. Орієнтовний перелік публікацій:

1) Прибудько Р.М., Ходаков К.А. Компенсатор реактивної потужності, Київ: XI міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2018», збірник статей, 2018;

2) Вербицький, Є. В. Аналізатор параметрів якості електромережі для вибору типу та потужності компенсатора реактивної потужності / Є. В. Вербицький, К. А. Ходаков // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2018.

## 8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-4	Вербицький Є. В., доц.		

9. Дата видачі завдання 23.04.2018 р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строки виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
	Опис параметрів якості електроенергії	23.04.2018 – 01.05.2018	
	Аналіз видів навантажень	01.05.2018 – 01.09.2018	
	Аналіз видів компенсаторів	01.09.2018 – 10.09.2018	
	Огляд аналізаторів	10.09.2018 – 20.09.2018	
	Визначення складових потужності	20.09.2018 – 25.09.2018	
	Аналіз доцільності компенсації	25.09.2018 – 01.10.2018	
	Особливості вибору компенсатора	01.10.2018 – 12.10.2018	
	Розробка аналізатора	12.10.2018 – 12.11.2018	
	Проведення експериментальних досліджень	12.11.2018 – 26.11.2018	
	Розробка стартап - проекту	26.11.2018 – 03.12.2018	

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

К. А. Ходаков

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_

(підпис)

Є. В. Вербицький

(ініціали, прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація «Аналізатор параметрів якості електроенергії» присвячена вибору типу та потужності компенсатора реактивної потужності на основі вимірних параметрів якості електроенергії.

Мета даного дослідження полягає у досягненні максимального економічного ефекту та регламентованих показників якості електроенергії при виборі типу та потужності компенсатора реактивної потужності.

В роботі обґрунтовано доцільність попереднього аналізу показників якості електромережі перед вибором параметрів компенсатора. Розроблено структуру дешевого та компактного аналізатора. Запропоновано методику вибору параметрів компенсатора реактивної потужності.

В результаті використання розробленого програмно-апаратного комплексу для трьох типів навантажень: лінійного реактивного, нелінійного реактивного та динамічного вдалося досягти щорічного економічного ефекту, що склав 104.3% для лінійного, 17.9% для нелінійного і 44.7% для динамічного навантаження від початкової вартості компенсатора, що свідчить про доцільність практичного використання програмно-апаратного комплексу.

**Ключові слова:** компенсатор реактивної потужності; параметри якості електроенергії; аналізатор параметрів якості електроенергії.

## ABSTRACT

The master's dissertation "The analyzer of parameters of electric power" is devoted to the choice of type and power of the reactive power compensator on the basis of measured parameters of electric power quality.

The purpose of this study is to achieve maximum economic effect and regulated indicators of electric power quality when choosing the type and power of the reactive power compensator.

The work substantiates the expediency of preliminary analysis of the quality indicators of the grid before choosing the compensator parameters. The structure of a cheap and compact analyzer is developed. The method of selecting the parameters of the reactive power compensator is proposed.

As a result of the use of the developed software and hardware complex for three types of loads: linear reactive, nonlinear reactive and dynamic, it was possible to achieve an annual economic effect of 104.3% for linear, 17.9% for nonlinear and 44.7% for dynamic load from the initial value of the compensator, which indicates about expediency of practical use of software and hardware complex.

**Keywords:** reactive power compensator; parameters of electric power quality; power quality parameter analyzer.

## АННОТАЦИЯ

Магистерская диссертация «Анализатор параметров качества электроэнергии» посвящена выбору типа и мощности компенсатора реактивной мощности на основе измеренных параметров качества электроэнергии.

Цель данного исследования заключается в достижении максимального экономического эффекта и регламентированных показателей качества электроэнергии при выборе типа и мощности компенсатора реактивной мощности.

В работе обоснована целесообразность предварительного анализа показателей качества электросети перед выбором параметров компенсатора. Разработана структура дешевого и компактного анализатора. Предложена методика выбора параметров компенсатора реактивной мощности.

В результате использования разработанного программно-аппаратного комплекса для трех типов нагрузок: линейного реактивного, нелинейного реактивного и динамического удалось достичь ежегодного экономического эффекта, составил 104.3% для линейного, 17.9% для нелинейного и 44.7% для динамической нагрузки от начальной стоимости компенсатора, что свидетельствует о целесообразности практического использования программно-аппаратного комплекса.

**Ключевые слова:** компенсатор реактивной мощности; параметры качества электроэнергии; анализатор параметров качества электроэнергии.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП .....	6
1. ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ. МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАННЯ І РОЗРАХУНКУ. ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРИ ВИБОРІ ТИПУ КОМПЕНСАТОРА.....	10
1.1.Показники якості електроенергії.....	10
1.2.Види навантажень та їх вплив на параметри якості електроенергії	15
1.3.Типи компенсаторів реактивної потужності.....	16
1.4.Огляд аналізаторів параметрів якості електроенергії .....	19
2. МЕТОДИКА ВИБОРУ КОМПЕНСАТОРА ПО ПРОФІЛЮ СПОЖИВАНОЇ ПОТУЖНОСТІ .....	24
2.1.Складові потужності.....	24
2.2.Аналіз доцільності компенсації реактивної потужності.....	25
2.3.Особливості вибору типу компенсатора від параметрів якості електроенергії .....	28
2.4.Особливості використання алгоритму на практиці.....	30
3. РОЗРОБКА АНАЛІЗАТОРА ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ 35	
3.1.Розробка структурної схеми аналізатора.....	35
3.2.Розробка схеми електричної принципової. Розрахунок елементів..	36
3.3.Розробка алгоритму роботи системи керування.....	47
3.4.Розробка друкованої плати .....	50
4. ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	55
4.1.Побудова дослідного макету аналізатора ПЯЕ.....	55
4.2.Підбір типу та параметрів компенсатора .....	58
5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ.....	66

5.1.Опис ідеї проекту .....	66
5.2.Технологічний аудит ідеї проекту.....	69
ВИСНОВКИ.....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80
ДОДАТОК 1.....	85
ДОДАТОК 2.....	86
ДОДАТОК 3.....	87
ABSTRACT .....	91



## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

ПЯЕ – параметри якості електроенергії;

ЕЕ – електроенергія;

ДПФ – дискретне перетворення Фур'є;

ДН – давач напруги;

ДС – давач струму;

СК – система керування;

АЦП – аналого – цифровий перетворювач;

МК – мікроконтролер;

ПК – персональний комп'ютер;

КП – карта пам'яті;

ТЕО – техніко-економічне обґрунтування;

SWOT – матриця аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities).

## ВСТУП

**Актуальність.** Важливим фактором що впливає на рівень прибутку підприємств є організація енергоефективності, адже при низькій енергоефективності споживається більше електричної енергії, що призводить до додаткових витрат. Підвищення енергоефективності використання енергії електричної мережі може забезпечуватись шляхом встановлення компенсаторів реактивної потужності. Правильний підбір типу та потужності компенсатора реактивної потужності дозволить досягнути максимального економічного ефекту.

За даними VDEW (Association of German Power Supply Companies), в розподільних електромережах Німеччини, завдяки компенсації реактивної потужності до середньозваженого значення  $\cos \varphi = 0.9$ , що відбулось ще в 1999 році було зекономлено близько 9 млрд кВт · год енергії, що склало понад 20% від сумарного (36,4 млрд кВт · год) обсягу транзитних втрат [1].

Якщо при підключенні резистивного навантаження струм співпадає по фазі з напругою, та від джерела споживається лише активна потужність, то при ємнісному навантаженні струм випереджає по фазі напругу, а при індуктивному – відстає, що називається зсувом фаз, та є однією з причин появи в мережі реактивної енергії. Наступними ж причинами появи реактивної потужності можуть бути вищі гармоніки струму, спотворення форми напруги та струму, перевантаження мережі. Якщо реактивну потужність не компенсувати, то від генератора буде відбиратись більша повна потужність, а значить збільшиться величина струму в передавальних лініях і втрат на опорі провідників з усіма негативними наслідками – нагрів, провисання і обрив проводів в розподільних мережах, зниження пропускної здатності мереж, падіння напруги, погіршення якості переданої електроенергії [21].

Тобто при компенсації реактивної енергії зменшуються втрати при передачі електричної енергії, покращується якість переданої енергії, знижується несиметрія струму та напруги, знижується перевантаження через зменшення навантаження генератора, підвищення ефективності використання електричної енергії [22].

Задача компенсації реактивної потужності ускладнюється у зв'язку зі збільшенням споживачів з імпульсним режимом споживання електричної енергії, від чого виникають часті перехідні процеси під час яких обсяг і характер потужності весь час змінюється. Тому актуальною задачею є моніторинг характеру енергії, що споживається від мережі для вибору параметрів компенсатора реактивної потужності, при встановленні якого досягатиметься висока економічна ефективність системи компенсації реактивної потужності.

**Мета і завдання дослідження:** розробка аналізатора параметрів якості електричної енергії з програмним забезпеченням, для вибору типу та потужності компенсатора реактивної потужності з максимальним економічним ефектом.

Для досягнення мети розглядалися наступні **завдання:**

- Визначення складових потужності які необхідно компенсувати;
- Аналіз доцільності компенсації реактивної енергії на основі визначення економічного ефекту;
- Розробка методики вибору типу та потужності компенсатора від параметрів якості електричної мережі;
- розробка аналізатора параметрів якості електричної енергії з програмним забезпеченням.

*Об'єктом дослідження* є методи покращення параметрів якості електричної енергії в мережах.

*Предмет дослідження* – методика вибору типу та потужності компенсатора для досягнення максимального економічного ефекту та регламентованих величин параметрів якості електроенергії.

#### **Методи досліджень.**

Теоретичні положення дисертації побудовані на базі теорії електричних кіл, інформаційних технологій, теорії передачі інформації та обробки сигналів, мікропроцесорного програмування та теорії імовірності. При вирішенні задач дисертації використовувались принципи аналізу гармонійних складових сигналів, побудовані на основі дискретного перетворення Фур'є. Розроблені алгоритми було реалізовано у програмному макеті MatLab.

#### **Наукова новизна даних досліджень полягає у:**

- Обґрунтуванні доцільності попереднього аналізу параметрів електроенергії перед встановленням компенсатора реактивної потужності, для досягнення максимального економічного ефекту;
- Розробці методики визначення типу та потужності компенсатора реактивної енергії для забезпечення необхідних значень параметрів якості електроенергії та досягнення максимального економічного ефекту.

#### **Практична цінність отриманих результатів:**

- Розроблено компактний та дешевий аналізатора параметрів якості електричної мережі з програмним забезпеченням та користувацьким інтерфейсом;
- Запропоновано алгоритм вибору виду та потужності компенсатора реактивної потужності від параметрів якості електричної мережі;
- Розроблений програмно-апаратний комплекс дозволяє визначити величину параметрів якості електричної мережі, вид, потужність компенсатора та економічний ефект для визначеного типу та потужності компенсатора.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати досліджень та розробок доповідались на міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Електроніка – 2018».

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 2-ох публікаціях:

1. Прибудько Р.М., Ходаков К.А. Компенсатор реактивної потужності, Київ: XI міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2018», збірник статей, 2018;

2. Вербицький, Є. В. Аналізатор параметрів якості електромережі для вибору типу та потужності компенсатора реактивної потужності / Є. В. Вербицький, К. А. Ходаков // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2018.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 38 найменувань і 3 додатків. Загальний обсяг роботи складає 99 сторінок, в тому числі 79 сторінок основного тексту, 34 рисунки і 19 таблиць.

# **1. ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ. МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАННЯ І РОЗРАХУНКУ. ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРИ ВИБОРІ ТИПУ КОМПЕНСАТОРА**

## **1.1. Показники якості електроенергії**

Компенсатор реактивної потужності знижує реактивну складову струму що протікає через генератор, від чого відбувається зниження навантаження на генератор, що призводить до неявного покращення параметрів електричної мережі. Оскільки в таких ланцюгах має місце взаємозначна відповідність миттєвих і інтегральних характеристик, всі їх енергетичні показники пов'язані між собою пропорційними залежностями. Це дає можливість при компенсації оптимізувати і інші показники системи [2]. Тому доцільно розглянути детальніше ці показники.

Необхідним фактором для нормалізації якості електричної енергії є організація контролю показників параметрів якості електроенергії (ПЯЕ). Якість електричної енергії описується параметрами якості, що також називають показниками якості електричної енергії, які визначають ступінь придатності електричної енергії для використання за призначенням. Існують стандартизовані показники якості електричної енергії, значення яких є нормованими, згідно ГОСТ 13109-97, ДСТУ EN 50160:2010, ДСТУ EN 50160:2014 показниками якості електричної енергії є [3,4,5]:

- усталене відхилення напруги  $\delta_{Uy}$ ;
- розмах зміни напруги  $\delta_{Ut}$ ;
- доза флікера  $P_t$ ;
- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$ ;
- коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги  $K_{U(n)}$ ;
- коефіцієнт несиметрії напруги  $K_{2U}$ ;
- відхилення частоти  $\Delta f$ ;

- тривалість провалу напруги  $t_n$ ;
- імпульсна напруга  $U_{imn}$ ;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги  $K_{перU}$ .

Відхилення напруги характеризується показником - усталене відхилення напруги  $\delta_{Uy}$ . На затискувачах споживачів електричної енергії нормовані значення дорівнюють відповідно  $\pm 5 \%$  і  $\pm 10 \%$  від номінального значення напруги мережі. Норми по цьому показнику якості електроенергії в точках загального приєднання споживачів до мереж напругою 0,38 кВ повинні бути встановлені у договорах на використання електричної електроенергії між організацією, що здійснює постачання енергії і споживачем [3].

Коливання напруги характеризується показниками [3]:

- розмах зміни напруги  $\delta_{Ut}$ ;
- доза флікеру  $P_t$ .

Несинусоїдальність напруги характеризується такими показниками [3]:

- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$ ;
- коефіцієнт n-ої гармонічної складової напруги  $K_{U(n)}$ .

Несиметрія напруги характеризується такими показниками [3]:

- коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності  $K_{2U}$ ;
- коефіцієнт несиметрії напруги по нульовій послідовності  $K_{0U}$ .

Значення цих показників в точках загального приєднання у мережах 0,38 кВ дорівнюють 2 і 4 %.

Регламентовані величини показників [3]:

#### 1. Відхилення напруги

- на затискувачах споживачів електричної енергії: нормально допустиме  $\pm 5 \%$ , максимально допустиме  $\pm 10 \%$
- в точках загального приєднання споживачів електричної енергії до електричних мереж напругою 0,38 кВ і більш повинні бути встановлені в договорах на використання електричної енергії між енергопостачальною

організацією і споживачем з урахуванням необхідності виконання норм стандарту на затискувачах споживачів електричної енергії.

## 2. Коливання напруги [3]:

- залежності  $dU_t$  % від частоти змін напруги що повторюються за хвилину;
- значення суми  $dU_y + dU_t$  в точках приєднання до мереж 0,38 кВ до  $\pm 10$  %;
- граничне допустиме значення для коротко термінової дози флікеру  $P_t = 1.38$ , а для тривалої дози флікера  $P_t = 1$  (форма коливань відрізняється від меандру) .

## 3. Несинусоїдальність напруги [3]:

- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_u$  % (табл.1.1);
- коефіцієнт n-ї гармонічної складової напруги  $K_u(n)$  % .

## 4. Несиметрія напруги [3]:

- $K_{2u}$  в точках загального приєднання до електричних мереж 2 % та 4%;
- $K_{0u}$  в точках загального приєднання до чотирьох провідних електричних мереж 0,38 кВ 2 % и 4%.

У табл. 1.1 наведено значення коефіцієнта спотворення [3].

Таблиця 1.1.

Нормально та гранично допустимі значення коефіцієнта спотворення напруги

Напруга U, кВ	Нормально допустимі величини $K_U$ , у.о.	Гранично допустимі величини $K_U$ , у.о.
0.38	8	12
6-20	5	8
35	4	6
110-330	2	3



5. Відхилення частоти  $\pm 0,2$  Гц и  $\pm 0,4$  Гц [3].

6. Провал напруги: гранично допустимі значення тривалості провалу напруги у мережах до 20 кВ включно дорівнює 30 с. Тривалість провалу напруги що автоматично зникає в будь-якій точці приєднання до мереж визначається витримками часу релейного захисту і автоматики [3].

7. Імпульс напруги [3]:

- грозові імпульсні напруги;
- комутаційні 0,38 кВ – 4.5 кВ; 6 кВ – 27 кВ; 10 кВ – 43 кВ; 35 кВ – 148 кВ; 110 кВ – 363 кВ.

8. Тимчасові перенапруги (табл. 1.2) [3].

Таблиця 1.2

Нормовані значення тимчасових перенапруг

Тривалість $t_{перU}$ , с	$K_{перU}$ , у.о.
До 1	1.47
До 20	1.31
До 60	1.15

9. Напруга гармонік. За нормальних робочих умов протягом кожного тижневого періоду 95 % середньоквадратичних значень напруги кожної гармоніки, усереднених на 10-ти хвилинному проміжку, мають бути меншими чи рівними значенням, що їх наведено в табл. 1.3. Резонанси можуть спричинювати вищі напруги окремих гармонік [3].

Таблиця 1.3.

Величини напруг окремих гармонік до 25-го порядку в точках приєднання, у відсотках від напруги першої гармоніки  $U_1$

Непарні гармоніки				Парні гармоніки	
Не кратні 3		Кратні 3			
Порядок h	Відносна амплітуда Uh	Порядок h	Відносна амплітуда Uh	Порядок h	Відносна амплітуда Uh
5	6.0%	3	5.0%	2	2.0%
7	5.0%	9	1.5%	4	1.0%
11	3.5%	15	0.5%	6...24	0.5%
13	3.0%	21	0.5%	-	-
17	2.0%	-	-	-	-
19	1.5%	-	-	-	-
23	1.5%	-	-	-	-
25	1.5%	-	-	-	-

Величина окремих ПЯЕ в мережі залежить не тільки від якості форми напруги генератора, а також від споживачів електричної енергії. Найбільш негативний вплив на описані вище ПЯЕ виконується нелінійними навантаженнями з частими перехідними процесами, які під'єднані до мережі. Для визначення залежності ПЯЕ від виду споживачів потрібно розглянути їх характер впливу на мережу. Тому розглянемо детальніше види навантажень в електричних мережах, та їх вплив на ПЯЕ.

## 1.2. Види навантажень та їх вплив на параметри якості електроенергії

Форма струму та напруги мережі визначається характером навантаження, які можна розділити на [23]:

- лінійне;
- нелінійне;
- різкозмінне.

При під'єднанні до мережі лінійного навантаження, форма струму яка їм споживається є пропорційною напрузі. Прикладами навантажень можуть бути резистивні, ємнісні, індуктивні – лінійні навантаження, тобто не залежать від величини струму, це лампи розжарювання, нагрівачі та інші. Форма реактивної енергії що створюється таким навантаженням містить постійний характер та визначається зсувом фаз напруги та струму [24].

Нелінійне навантаження – це навантаження струм споживання якого несинусоїдальний при умові живлення від синусоїдального джерела напруги (тобто це навантаження генерує вищі гармоніки струму (2, 3, 4, та інші)). Характер та величина опору ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ) залежить від струму ( його величини, напрямку). Прикладами таких навантажень є тиристорні або діодні випрямлячі. Сучасне обладнання містить в собі вбудовані блоки усунення гармонійних спотворень споживаного струму (THD фільтри), але все рівно в якійсь мірі вони вносять спотворення в мережу. Форма реактивної енергії що створюється таким навантаженням містить непостійний характер та визначається не тільки зсувом фаз напруги та струму, а також нелінійністю споживання струму, спотворенням форми вищими гармоніками [25].

Різкозмінне навантаження – це навантаження величина та (або) форма струму споживання якого часто змінюється. Стрибкоподібну зміну навантаження можуть викликати вмикання електродвигунів великим пусковим струмом. При роботі споживачів з різко змінним навантаженням

проявляється зниження якості електроенергії у вигляді коливань та відхилень напруг, а при малих потужностях джерела живлення – коливання частоти. Поява коливань напруги в системах електропостачання негативно проявляється на роботі чутливих до них споживачів, та в першу чергу на роботу установок електричного освітлення. Форма реактивної потужності що генерується таким навантаженням містить різко змінний характер, визначається частими перехідними процесами, спотвореннями форми, вмістом вищих та інтергармонік [26].

Для вирішення проблем негативного впливу на мережу навантаженнями використовують компенсатори реактивної потужності. Які зменшують негативний вплив на ПЯЕ мережі, що створюється лінійними, нелінійними та різкозмінними навантаженнями. Існуючі на ринку компенсатори відрізняються своїми параметрами, видом, а також принципом роботи. Розглянемо існуючі типи компенсаторів, та їх особливості, адже ефективність використання компенсатора визначається правильним підбором його параметрів залежно від виду та характеру навантаження [22].

### **1.3. Типи компенсаторів реактивної потужності**

Розрізняють наступні типи компенсаторів:

1. Статичні компенсатори;
2. Активні фільтри;
3. Активні фільтри з динамічною компенсацією.

Розглянемо детальніше кожен з типів.

Статичні компенсатори складаються з конденсаторних батарей ( $C1, C2, C3$ , рис. 1.1), реакторів ( $L1, L2, L3$ , рис. 1.2) тиристорними ключами ( $VS1...VS6$ , рис. 1.1, рис. 1.2), давачів струму ДС, давачів напруги ДН, системи керування СК. Найбільш ефективно працюють в лінійних ланцюгах, усувають лише реактивну складову по першій гармоніці. Покращують

коефіцієнт потужності, зменшують коефіцієнт спотворення, коефіцієнт несиметрії, провали напруг [10,11]. Даний тип компенсаторів дешевший від інших, оскільки складається лише з реактивних елементів та невеликої кількості напівпровідникових ключів, зазвичай тиристорів.

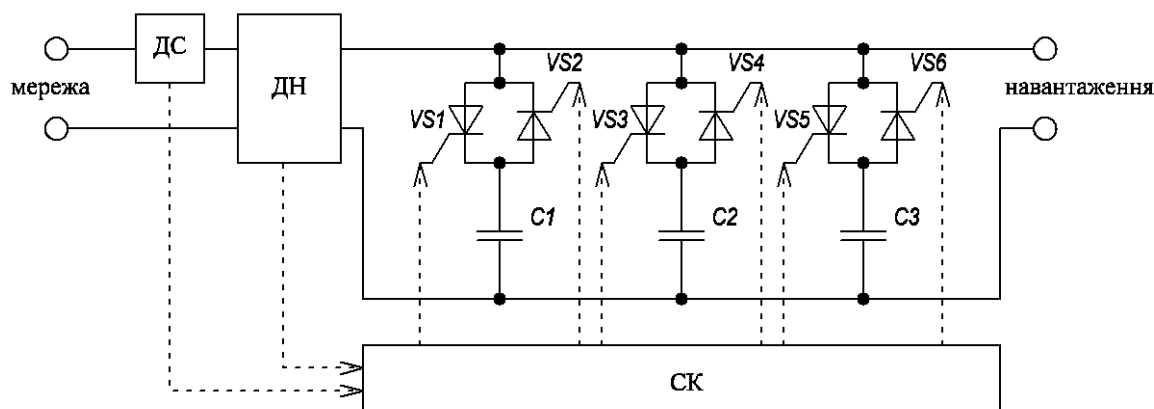


Рис. 1.1 Схема ємнісного статичного тиристорного компенсатора.

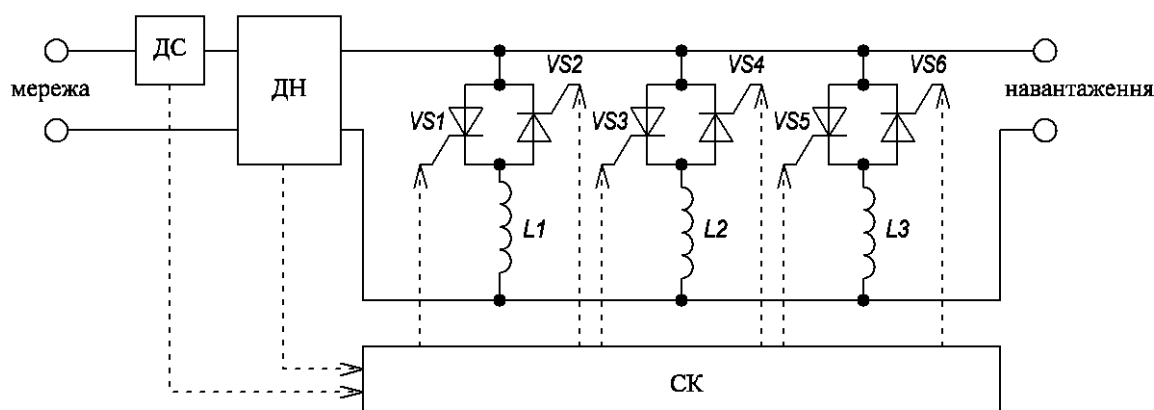


Рис. 1.2 Схема індуктивного статичного тиристорного компенсатора.

Активні фільтри (рис. 1.3), що використовуються для нелінійних ланцюгів, окрім реактивної потужності першої гармоніки компенсують потужність спотворення. На відміну від конденсаторних установок також зменшують коефіцієнт гармонійних складових, дозу флікера, перенапругу,

відхилення напруги [12,13]. Топології таких компенсаторів містять велику кількість ключів (VT1 – VT6, рис. 1.3), як правило IGBT – транзисторів високої вартості.

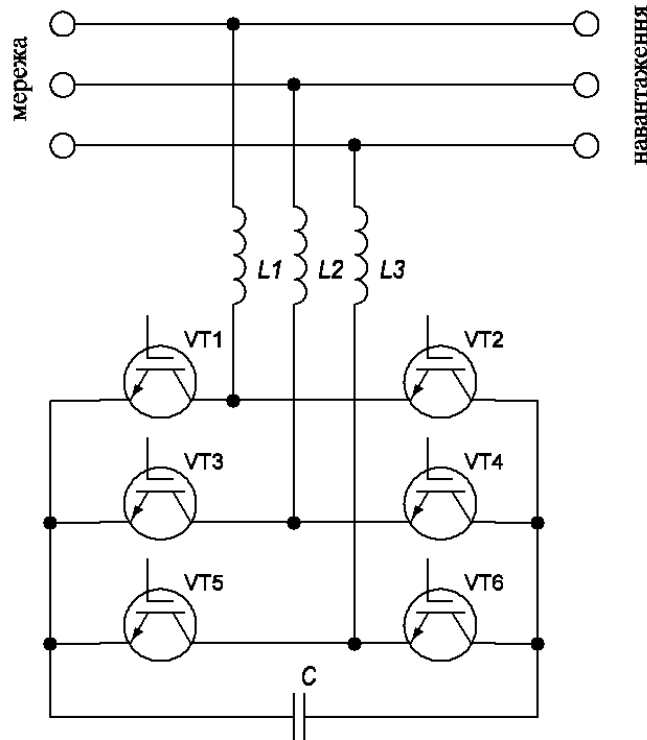


Рис. 1.3 Схема паралельного активного фільтра

Активні фільтри з динамічною компенсацією (рис 1.3). На відміну попереднього виду ще більш ефективні при перехідних процесах. Краще реагують на зміну навантаження, та використовуються при різко змінних навантаженнях [14-16, 36]. Побудовані також на IGBT – транзисторах, але з кращими динамічними характеристиками, та в результаті – ще більшої вартості.

Розрахунок основних параметрів пристроїв компенсації реактивної потужності (тип обладнання, його потужність, частота налаштування фільтрокомпенсуючих пристроїв і т.д.) є нетривіальним завданням пошуку компромісу технічних характеристик і економічних параметрів.

Простий підхід з використанням таблиць для розрахунку потужності компенсуючих пристроїв, а також використання стандартної лінійки пристроїв компенсації реактивної потужності із заздалегідь визначеними потужностями насправді може бути застосований лише фахівцями після виконання певних розрахунків. При цьому необхідно врахувати існуючий рівень гармонійних складових що наявні в мережі, специфіку навантаження (різкозмінне, лінійне, нелінійне, несиметричне та інші). Неприйняття до уваги цих факторів може призвести до неоптимального технічного рішення і як наслідок до низьких економічних показників проекту по впровадженні компенсаторів реактивної потужності. Тому актуальним є використання аналізаторів якості параметрів електричної енергії для правильного підбору параметрів та типу компенсатора [37].

#### **1.4. Огляд аналізаторів параметрів якості електроенергії**

Діючий стандарт (ГОСТ ІЕС 61000-4-30—2017) встановлює для кожного вимірюваного показника два класи - А і S, де для кожного класу визначені методи вимірювань і відповідні вимоги до якості функціонування [6].

Клас А. Даний клас застосовують, якщо необхідно проведення точних вимірювань, наприклад, при виконанні умов договорів, які передбачають можливість вирішення спірних питань, при перевірці відповідності стандартам і т. д.. Будь-які вимірювання показника, проведені двома різними засобами вимірювання, що відповідають вимогам класу А повинні при вимірюванні одних і тих же сигналів забезпечувати отримання узгоджених результатів з встановленої для даного показника невизначеністю [6].

Клас S. Даний клас використовується при статистичних застосуваннях, таких як обстеження або оцінка якості електричної енергії, можливо, при

обмеженій сукупності показників. Хоча використовуються інтервали часу вимірювань, еквівалентні класу А, вимоги до обробки класу S істотно нижче. При деяких обстеженнях можуть оцінюватися показники якості електричної енергії в різних точках вимірювань в мережі; при інших обстеженнях оцінюються показники якості електричної енергії в окремій точці протягом періоду часу, або в місцях розміщення всередині будівлі, або навіть всередині окремого великого зразка обладнання [6].

Аналізатори якості електроенергії - прилади, що містять пристрій для обробки результатів вимірювань різних електричних величин з метою якісного і кількісного аналізу їх на відповідність діючим нормам і вимогам. Часто містять також пристрій для реєстрації та запам'ятовування подій порушення нормативних вимог. Зазвичай поєднуються з пристроями для вимірювання електричних величин, наприклад, з лічильниками електричної енергії. Називаються також електроаналізатор.

Призначені для визначення відповідності якості електроенергії технічним нормам, стандартам і договірними умовами як у випадках разових інспекційних перевірок, так і при безперервному моніторингу. Дуже корисні також для пошуку і запобігання несправностей в системах розподілу енергії. За конструктивним виконанням аналізатори якості електроенергії можуть бути переносними і стаціонарними.

Вибір того чи іншого типу аналізатора визначається колом вирішуваних завдань. Типові застосування переносних аналізаторів такі:

- проведення енергетичних обстежень (енергоаудитів);
- складання енергетичного балансу;
- балансування мережі по фідерах і фазах;
- зняття графіків навантаження;
- підбір компенсаторів реактивної потужності;
- контроль функціонування енергосистем і мереж, виявлення і усунення несправностей і порушень.



Сучасні аналізатори якості електроенергії, сумісні з вимірювачами електричних величин, працюють за принципом стробування або семплування (від англійського *sampling*). Струм і напруга в мережі вимірюються протягом коротких проміжків часу багаторазово за період мережевої частоти. Кількість вимірювань за період для зручності подальшої обробки зазвичай одно цілої ступеня числа 2 і може досягати 512 або більше. В результаті на вхід аналізуючого пристрою надходить масив даних про миттєві значення струмів і напруг, та їх залежності від часу. Це дозволяє за допомогою математичних алгоритмів обчислити різні параметри якості електроенергії, а також розрахувати кількість електроенергії, що пройшла через точку підключення приладу за заданий час.

Аналізатори якості електроенергії фіксують велику кількість показників, в першу чергу - показники якості електроенергії, нормовані діючими стандартами. В Україні це стандарт ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». В інших країнах діють інші національні та міжнародні стандарти. Хоча показники якості електроенергії, нормовані цими стандартами, в основному, одні й ті ж, рекомендовані методики і формули для їх розрахунку можуть істотно відрізнятися. З цієї причини аналізатори якості електроенергії, розроблені для однієї країни, не завжди в повній мірі можуть застосовуватися в іншій країні.

Крім раніше перерахованих показників якості ЕЕ, аналізатори якості електроенергії зазвичай дозволяють визначити і велике число інших параметрів, що дозволяють оцінити якість електромереж, оптимальність розподілу навантажень і т.д.

Важливим параметром, який визначається практично всіма сучасними аналізаторами якості електроенергії, є величина фазового зсуву між струмом

і напругою. Наявність такого зсуву говорить про реактивний характер навантаження в ланцюзі.

Постійний контроль якості електроенергії є необхідною умовою безпечного застосування електрообладнання, а також безпосередньо позначається на економічних показниках як виробників, так і споживачів електроенергії. Незважаючи на те, що відповідальність за відповідність якості електроенергії, що поставляється споживачам, встановленим вимогам, несе енергопостачальна організація, в більшій мірі на якість електроенергії в електричних мережах впливають і самі споживачі. Наприклад, не виявлений вчасно споживачем і не усунений реактивний характер навантаження призводить до додаткових струмів в електромережі, приводячи до зайвих падінь напруги на них, виділенню потужності (розігріву), зносу комутаційного обладнання і т.д. Крім того, зазвичай постачальники електроенергії застосовують в цьому випадку до споживача економічні санкції у вигляді оплати за "реактивну енергію" або за знижений коефіцієнт потужності.

Основними виробниками аналізаторів якості електричної енергії є:

- Chauvin Arnoux (Франція);
- Меридіан (Україна);
- Circutor (Іспанія);
- Fluke Industrial (США);
- Sonel (Польща);
- АО «ПриСТ» (Росія);
- НПП «Енерготехника» (Росія);
- ООО НПП «Марс-Енерго» (Росія);
- ООО НПП «Прорив» (Росія).

Функції даних приладів:

- Вимірювання напруги, сили струму, потужності, фазового зсуву, коефіцієнта потужності та величину споживаної енергії;

- Визначення мінімальних та максимальних значень параметрів;
- Тривалість реєстрації показів – 10 днів;
- Економічна оцінка втрат енергії;
- Вимірювання коефіцієнта гармонік (напруги та струму);
- Вимірювання окремих гармонік напруги та струму - від 1-шої до 25-тої;
- Розширений аналіз гармонік (спектр гармонік, гармоніки потужності);
- Функція осцилографа;
- Реєстрація провалів та викидів напруги;
- Можливість комплексної оцінки показів;
- Збір даних при перехідних процесах;
- Флікер;
- Синхронізація часу по GPS.

### **Висновки до розділу 1:**

1. Розглянуто параметри якості електричної мережі та методику їх розрахунку.
2. Проведено аналіз видів навантажень та їх вплив на параметри якості електроенергії.
3. Проведено аналіз типів компенсатора та їх вплив на параметри якості електроенергії.
4. Розглянуто аналізатори параметрів якості електроенергії, їх типи, функціонал.

## 2. МЕТОДИКА ВИБОРУ КОМПЕНСАТОРА ПО ПРОФІЛЮ СПОЖИВАНОЇ ПОТУЖНОСТІ

### 2.1. Складові потужності

Для вибору компенсатора аналізуються такі параметри спожитої енергії:

- спектр виміряних значень струму і напруги мережі;
- складові потужності: повна  $S$ , активна  $P$ , реактивна  $Q$ , спотворення  $D$  і пасивна  $F$  [2];
- втрати в мережі та надлишкову потужність генератора, спричинених наявністю пасивної потужності;
- співвідношення параметрів, визначених у попередніх пунктах, на окремих періодах мережі.

Для повної компенсації реактивної потужності необхідно повністю компенсувати пасивну потужність  $F$ , але це не завжди доцільно, оскільки при цьому потужність компенсатора може бути надлишковою, що призведе до збільшення строку окупності системи. Така ситуація може виникнути в мережах з частими перехідними процесами, які призводять до коливання пасивної потужності в широкому діапазоні значень. У цьому випадку в певні інтервали часу в мережі з'являються аномально великі значення пасивної потужності, компенсувати які є недоцільним. Тому компенсатор реактивної потужності має бути розрахований на значення пасивної потужності що дозволяє компенсувати реактивну потужність протягом переважного часу роботи навантажень.

У загальному випадку вибір потужності компенсатора є задачею оптимізації, цільовою функцією якої може бути строк окупності системи, а обмеженнями – необхідні значення параметрів якості електроенергії [3,4,5].

Одним з завдань компенсатора є зменшення потужності втрат в мережі що визначаються пасивною потужністю  $F$ , яку часто називають реактивною потужністю  $Q$  [2] для нелінійних ланцюгів. При синусоїдальних процесах реактивна потужність (потужність зсуву)  $Q$  є рівною активній  $P$ , а потужність спотворення  $D$  рівна нулю [2].

Розрахунок реактивної потужності (потужності зсуву)  $Q$ , потужності спотворення  $D$ , пасивної потужності  $F$  здійснюється за формулами [2]:

$$Q = \sum_{k=l=1}^M U_k I_l \sin(\beta_l - \alpha_k), \quad (2.1)$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = \sqrt{\sum_{k \neq l}^M [U_k^2 I_l^2 + U_l^2 I_k^2 - 2U_k I_l U_l I_k \cos(\phi_l - \phi_k)]}, \quad (2.2)$$

$$F^2 = Q^2 + D^2, \quad (2.3)$$

де  $I_l, U_k$  - діюче значення струму та напруги,  $\beta_l, \alpha_k$  - фази струму та напруги,

$$\phi_l = \arctg\left(\frac{a_{l(I)}}{b_{l(I)}}\right), \quad \phi_k = \arctg\left(\frac{a_{k(U)}}{b_{k(U)}}\right), \quad P, S - \text{активна та повна потужності.}$$

## 2.2. Аналіз доцільності компенсації реактивної потужності

В системах електропостачання, де в якості джерела використовується генератор напруги кінцевої потужності, втрати при передачі енергії від нього до навантаження пропорційні діючому значенню струму  $I^2$  і складаються з суми втрат[2]:

$$P_{em} = I^2 \cdot R_{\Sigma} = I_F^2 \cdot R_{\Sigma} + I_P^2 \cdot R_{\Sigma} = R_{\Sigma} \frac{F^2}{U^2} + R_{\Sigma} \frac{P^2}{U^2}, \quad (2.4)$$

де  $I^2 = I_F^2 + I_P^2$  - представлення величини діючого струму навантаження через складові струму що визначаються пасивною та активною потужністю,  $R_\Sigma$  - сумарний активний опір джерела та мережі,  $U$  – напруга генератора.

Через те що потужність навантаження змінюється від періоду до періоду, значення повного  $I$ , пасивного  $I_F$  та активного  $I_P$  струмів також змінюється, тому їх доцільно розглядати як функції від номера періоду мережі  $n$ ,  $I(n)$ ,  $I_F(n)$ ,  $I_P(n)$ .

Очевидно що в такій системі компенсація пасивної потужності  $F$  призведе до зменшення втрат в лініях електромережі на величину  $\Delta P_{вт}$ :

$$\Delta P_{вт}(n) = \left( I_F^2(n) - \left( I_F(n) - I_{комп}(n) \right)^2 \right) R_\Sigma, \quad (2.5)$$

де  $I_{комп}(n)$  – струм компенсатора.

За час експлуатації системи компенсації  $t_{екс}$ , що еквівалентний  $N$  періодам напруги мережі, зменшення витрат  $C_{вт}$  при передачі енергії завдяки компенсації пасивної потужності визначають наступним чином:

$$C_{вт} = C_e \sum_{n=1}^N \Delta P_{вт}(n), \quad (2.6)$$

де  $C_e$  – вартість електроенергії.

Також компенсація пасивної потужності  $F$  знижує встановлювану потужність генератора на значення  $\Delta P_G$ :

$$\begin{aligned} \Delta P_G &= \sqrt{F_{\max}^2 + P_{\max}^2} - \sqrt{\left( F_{\max} - P_{\kappa \max} \right)^2 + P_{\max}^2} = \\ &= U \left( \sqrt{I_{F \max}^2 + I_{P \max}^2} - \sqrt{\left( I_{F \max} - I_{комп \max} \right)^2 + I_{P \max}^2} \right), \end{aligned} \quad (2.7)$$

де  $P_{\kappa \max}$ ,  $P_{\max}$ ,  $F_{\max}$  – максимальні значення потужності компенсатора, активної та пасивної потужностей протягом  $N$  періодів, та відповідних їм струмів.

Як правило вартість генератора досить часто пропорційна його потужності. Тому економія коштів від компенсації може бути розрахована за наступною формулою:

$$C_G = k_{II} \Delta P_G, \quad (2.8)$$

де  $k_{II}$  – коефіцієнт пропорційності.

Отже економічний ефект  $E$  від компенсації пасивної потужності складається зі зменшення витрат при передачі енергії  $C_{em}$ , зменшення вартості генератора  $C_G$  а також додаткових витрат на купівлю та експлуатацію компенсатора  $C_K$ :

$$E = (C_G + C_{em}) - C_K = \left( k \Delta P_G + C_e \sum_{n=1}^N \Delta P_{em}(n) \right) - C_K =$$

$$= \left[ k_{II} U \left( \sqrt{I_{F \max}^2 + I_{P \max}^2} - \sqrt{(I_{F \max} - I_{комп \max})^2 + I_{P \max}^2} \right) + \right. \quad (2.9)$$

$$\left. + C_e \sum_{n=1}^N \left( I_F^2(n) - (I_F(n) - I_{комп}(n))^2 \right) R_{\Sigma} \right] - C_K,$$

Функція  $E$  в даному випадку є цільовою функцією задачі оптимізації економічного ефекту. Обмеженнями задачі оптимізації є параметри якості електричної енергії, які повинні відповідати стандарту якості електроенергії що діє в даній країні [5]. Цільова функція  $E$  є функцією двох параметрів: часу, який в даному випадку визначається кількістю періодів  $N$ , максимального струму компенсатора  $I_{комп \max}$ .

Очевидно що зі зростанням кількості періодів  $N$ , цільова функція  $E$  зростає.

При  $N=0$ , значення цільової функції є від'ємним,  $E = -C_K$ . Зі зростанням кількості періодів роботи значення  $E$  зростає. Якщо за час безвідмовної роботи компенсатора  $N$ , значення цільової функції стає додатнім, то такий компенсатор доцільно використовувати в даній системі електроживлення.

Очевидно що значення цільової функції доцільно аналізувати лише за значенням струму компенсатора, а кількість періодів  $N$  задавати часом

безвідмовної роботи компенсатора, оскільки після цього будуть додаткові затрати на відновлення роботи компенсатора.

На періодах роботи системи електроживлення де пасивний струм менший за максимальне значення струму компенсатора, а значить може бути компенсований повністю, формула 9 матиме вигляд:

$$E = \left( k_{II} U \left( \sqrt{I_{F \max}^2 + I_{P \max}^2} - I_{P \max} \right) + C_e R_{\Sigma} I_F^2(n) \right) - C_K, \quad (2.10)$$

А на інших періодах загальний вигляд формули 9 не зміниться.

Тобто, формально на основі формул 9 і 10, задача оптимізації економічного ефекту може бути вирішена. Однак для практичного використання пропонованої методики необхідно врахувати неявну залежність вартості та типу компенсатора, який доцільно використовувати для компенсації, від параметрів якості електроенергії та характеру пасивної потужності  $F$ , які регламентовані стандартами якості електроенергії. Оскільки при порушенні норм якості параметрів ЕЕ постачальник несе відповідальність, тому він зацікавлений у проведенні заходів для покращення, одним з яких є встановлення компенсаторів. Аналіз впливу параметрів ЕЕ наведено в наступному розділі.

### **2.3. Особливості вибору типу компенсатора від параметрів якості електроенергії**

Обмеженнями які впливають на вибір компенсатора як правило є вміст вищих гармонік, який характеризується такими інтегральними показниками: коефіцієнт гармонік, THD, коефіцієнт спотворення, та пасивної потужності, зменшення значень яких неявно покращує інші параметри якості ЕЕ через зменшення навантаження на електричну мережу.

В електричних ланцюгах з струмом близьким до синусоїдального, вміст вищих гармонік мінімальний. Тому в таких мережах доцільно



використовувати статичні компенсатори, що є найдешевшими. А в ланцюгах з нелінійними навантаженнями використовувати активні фільтри зі звичайною чи динамічною компенсацією.

Тому з урахуванням обмежень на параметри якості ЕЕ алгоритм вибору параметрів компенсатора ускладниться та складатиметься з декількох етапів:

1. Розрахунок коефіцієнта потужності  $K_P$ , через середньоквадратичні значення струму першої гармоніки  $I_{1rms}$  та всього сигналу  $I_{rms}$ , величину кута фазового зсуву між першими гармоніками струму та напруги  $\varphi_1$ :

$$K_P = \frac{I_{1rms}}{I_{rms}} \cos \varphi_1. \quad (2.11)$$

2. Перехід до пункту 3 якщо розраховане значення коефіцієнта потужності  $K_P$  задовольняє умову  $K_P < 0.95$ , в іншому випадку використання компенсатора є недоцільним;

3. Розрахунок середнього значення вмісту вищих та інтергармонік [17] через певний інтегральний показник що регламентується в стандарті якості ЕЕ, в даному дослідженні використовується коефіцієнт гармонік  $K_G$ , що розраховується за значенням коефіцієнта потужності  $K_P$  після компенсації ( $K_P = 0.95$ ):

$$K_G = \frac{\sqrt{1 - K_P^2}}{K_P} = \frac{\sqrt{1 - 0.95^2}}{0.95} = 0.3287, \quad (2.13)$$

4. Якщо значення цього параметра не перевищує регламентований, то використовується статичний компенсатор, та вирішується задача оптимізації згідно формули 9, інакше перехід до пункту 5;

5. Аналіз ваги перехідних процесів вимірюваних значень струму та напруги, що здійснюються за формулою:

$$\frac{\sum_{n=1}^{N-1} \sqrt{I_d^2(n+1) - I_d^2(n)}}{I_{d\Sigma}}, \quad (2.14)$$

де  $I_d(n), I_d(n+1)$  – діюче значення струму за період  $n$  та  $n+1$ ,  $I_{d\Sigma}$  – діюче значення струму всіх періодів.

## 2.4. Особливості використання алгоритму на практиці

В описаному вище алгоритмі проводиться визначення гармонійних складових сигналу струму та напруги, що відбувається за допомогою однієї з найбільш розповсюджених процедур цифрової обробки сигналів, дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). Розглянемо приклад такого перетворення для двох дискретних синусоїдальних сигналів, з частотою  $F=50$  Гц, струму  $I=\sin(2\pi Ft-60)$  та напруги  $U=\sin(2\pi Ft)$ , з частотою дискретизації  $f_d=10$ кГц та проміжком часу  $t=(0\dots100/f_d)$ , що зображено на рис 2.1.

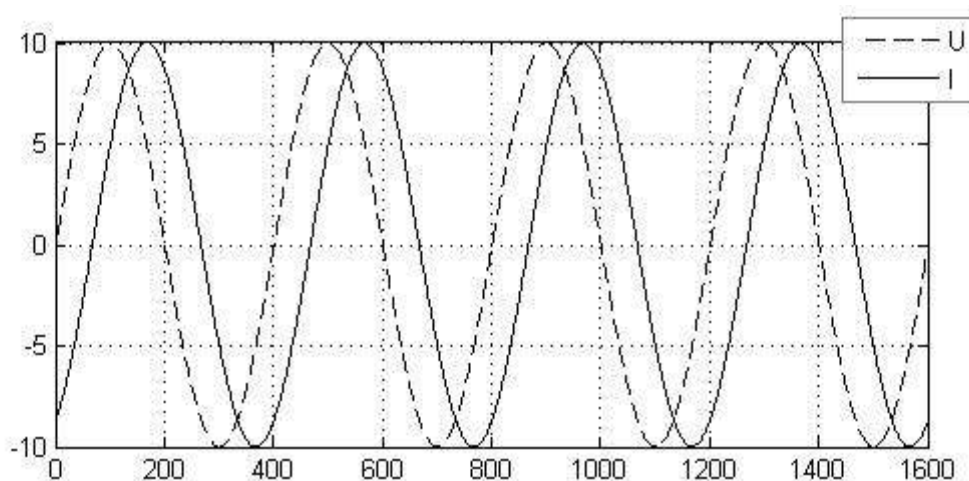


Рис. 2.1 Форми струму та напруги з вище описаними параметрами

Спектр перетворення Фур'є - в загальному випадку, функція комплексна, що описує комплексні амплітуди відповідних гармонік. Тобто значення спектра – комплексні числа, модуль яких визначає амплітуди відповідних частот, а аргументи – відповідні початкові фази.

Знайдемо амплітудний спектр сигналів зображених на рис 2.1, та розглянемо діапазон частот поблизу першої гармоніки (30...70 Гц, рис. 2.2):

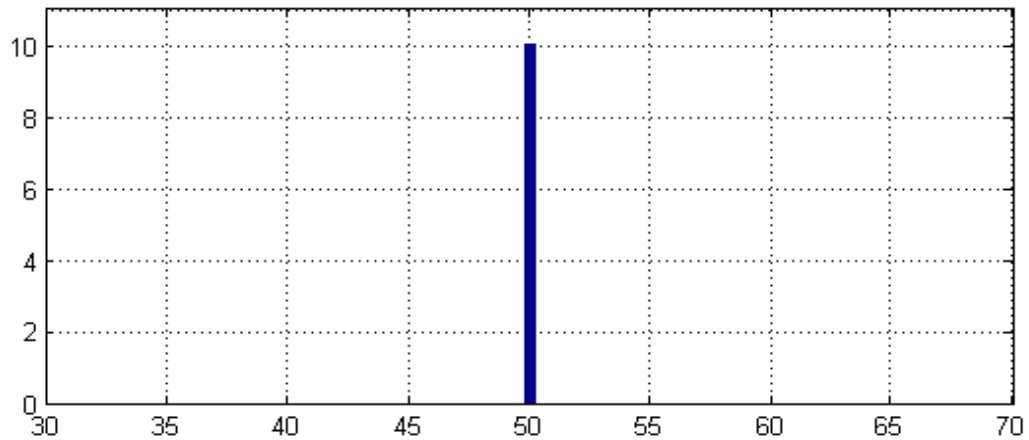


Рис. 2.2 Амплітудний спектр сигналів струму та напруги

Перша гармоніка чітко виділена на частоті 50 Гц, де комплексні значення першої гармоніки струму  $I_1$  та напруги  $U_1$  :

$$I_1 = -8.6603 - 5i, \quad U_1 = 0 - 10i.$$

Знайдемо кут зсуву  $\varphi$  між напругою та струмом для таких значень перших гармонік струму  $I_1$  та напруги  $U_1$ :

$$\begin{aligned} \varphi_U &= \arctan \frac{\text{real}(U_1)}{\text{imag}(U_1)} = \arctan \frac{0}{-10} = 0; \\ \varphi_I &= \arctan \frac{\text{real}(I_1)}{\text{imag}(I_1)} = \arctan \frac{-8.6603}{-5} = 60; \\ \varphi &= \varphi_U - \varphi_I = 0 - 60 = -60. \end{aligned}$$

Знайдений кут зсуву  $\varphi$  між напругою та струмом відповідає заданому, що свідчить про вірність методу розрахунку.

В реальних сигналах напруги мережі, через нестабільність частоти, перша гармоніка не чітко виділена на частоті 50 Гц. Для розгляду подібної ситуації задамося похибкою частоти у 0.2 % ( $F = 49.9$  Гц) та побудуємо спектр сигналів струму та напруги з новою частотою (рис 2.3, рис 2.4).

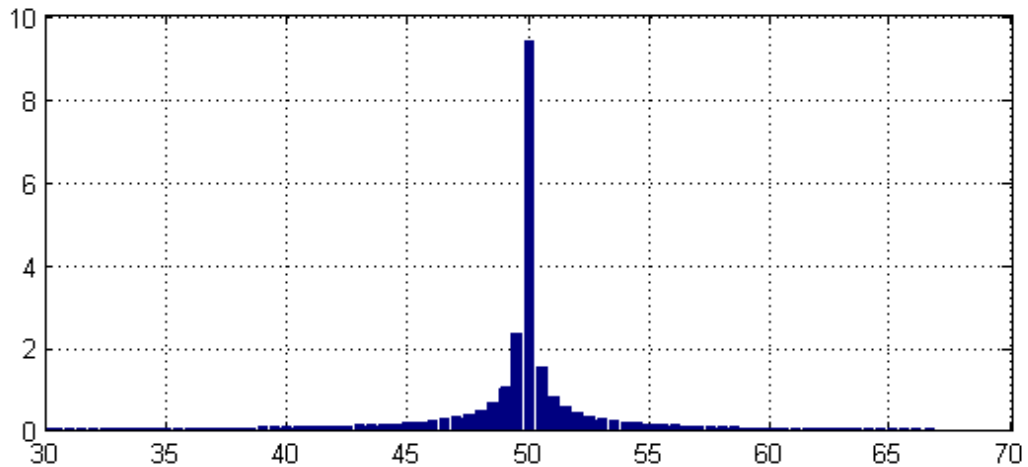


Рис. 2.3 Амплітудний спектр сигналу струму з частотою 49.9 Гц.

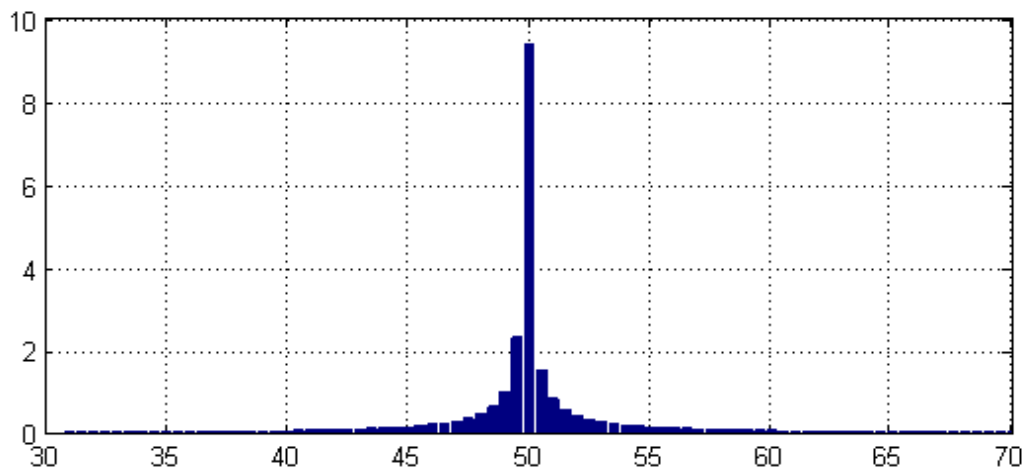


Рис. 2.4 Амплітудний спектр сигналу напруги з частотою 49.9 Гц.

У такому випадку визначення комплексних значень перших гармонік має визначатись сумою значень розкиданих в певному діапазоні частот. Діапазон частот можна визначити через середньоквадратичне відхилення  $\sigma$ , представивши спектр сигналу щільністю нормального розподілу:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{m=1}^N m^2 X(m) - \left( \sum_{m=1}^N m X(m) \right)^2}. \quad (2.15)$$

Використання діапазону частот  $(50 - 3\sigma \dots 50 + 3\sigma)$  Гц дозволить охопити близько 99.72 % розподілу першої гармоніки рис. 2.5.

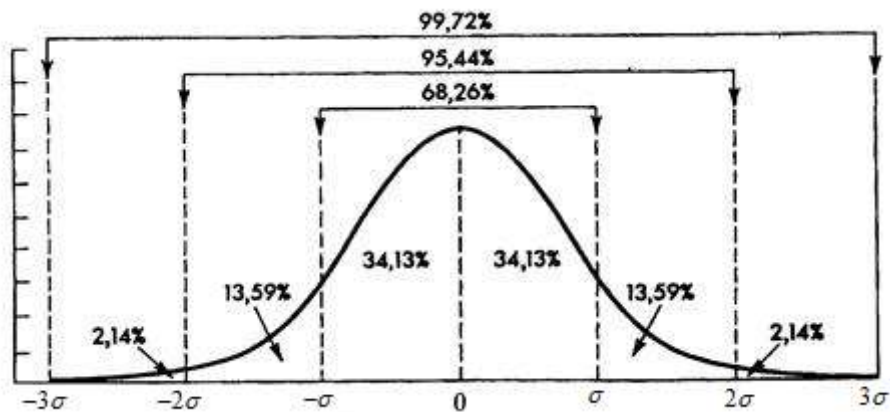


Рис. 2.5. Графік щільності нормального розподілу.

Визначимо діапазон частот для зображеного на рис. 2.4 спектра сигналу напруги рис. 2.6.

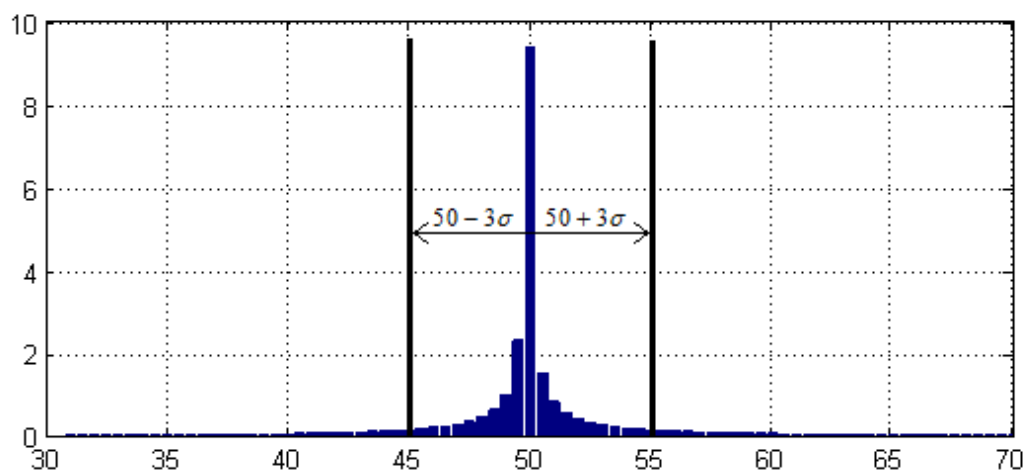


Рис. 2.6 Діапазон розкиду значень першої гармоніки в спектрі напруги.

Для перевірки правильності визначення діапазону (рис. 2.6), знайдемо сумарні комплексні значення перших гармонік та розрахуємо кут зсуву  $\varphi$  між напругою та струмом:

$$I_1 = -8.9377 - 4.4412i, U_1 = -0.6264 - 9.9687i$$

$$\varphi_{U_1} = \arctan \frac{\text{real}(U_1)}{\text{imag}(U_1)} = \arctan \frac{-0.6264}{-9.9687} = 3.5955;$$

$$\varphi_{I_1} = \arctan \frac{\text{real}(I_1)}{\text{imag}(I_1)} = \arctan \frac{-8.9377}{-4.4412} = 63.5770;$$

$$\varphi_1 = \varphi_U - \varphi_I = 3.5955 - 63.5770 = -59.9815.$$

Розраховане значення  $\varphi_1$  є близьким до розрахованого раніше  $\varphi$ , що свідчить про правильність вибору діапазону частот.

Таким чином при дослідженні сигналів напруги та струму мережі, з нестабільною частотою, виділення першої гармоніки в спектрі сигналу відбувається сумуванням певного діапазону частот, який визначається середньоквадратичним відхиленням відносно максимального значення.

## **Висновки до розділу 2:**

1. Розглянуто складові потужності;
2. Розроблено метод аналізу доцільності компенсації реактивної потужності;
3. Розглянуто особливості вибору типу компенсатора від параметрів якості електроенергії;
4. Розроблено алгоритм вибору типу компенсатора від параметрів якості електроенергії;
5. Визначено особливості використання алгоритму вибору параметрів компенсатора на практиці.

### **3. РОЗРОБКА АНАЛІЗАТОРА ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

#### **3.1. Розробка структурної схеми аналізатора**

Для вирішення поставленої задачі потрібний недорогий та компактний (мобільний) аналізатор якості ЕЕ. Швидкодія якого має бути достатньою для аналізу вищих гармонік, відповідно до ГОСТ 13109-97 [4], та складає близько 10 кГц. Для коректного аналізу вмісту інтергармонік, розрахунок параметрів має відбуватись відразу на всьому проміжку аналізованих даних, з чого випливає вимога у збереженні аналізованих даних, та до величини внутрішньої пам'яті.

Існуючі на ринку аналізатори ПЯЕ здійснюють розрахунок ПЯЕ по значенням виміряним за період, та усереднюють їх на заданому проміжку часу (наприклад для VR1710 це 1с – 20 хв), а також містять в собі надлишковий функціонал (аналіз дози флікера, функції осцилографа, реєстрація провалів та викидів напруг, синхронізація часу по GPS, визначення мінімальних та максимальних значень параметрів...), що для даного дослідження не використовуватиметься. Для вирішення поставленої задачі найкраще використовувати реєстратори напруги та струму [19,20], а саму обробку виконувати на комп'ютері з використанням власноруч написаного програмного забезпечення. Вартість реєстраторів напруги та струму також визначається їх програмним забезпеченням, яке для даного дослідження не використовуватиметься. Тому актуально розробити своє схемотехнічне рішення, яке відповідатиме описаним вище вимогам.

Для реалізації алгоритму вибору параметрів компенсатора, побудуємо структурну схему, яку зображено на рис. 3.1.

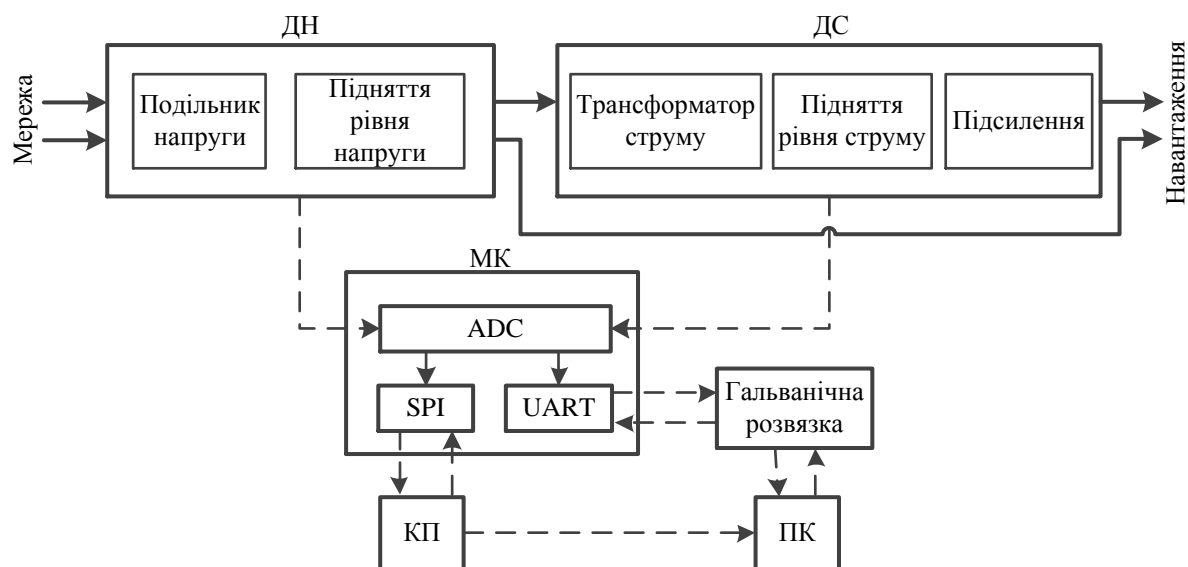


Рис. 3.1 Структурна схема аналізатора ПЯЕ

Функціональна схема містить давач напруги (ДН) та давач струму ДС, для узгодження їх з вимірювальним колом мікроконтролера МК за амплітудою встановлені подільник напруги та трансформатор струму відповідно. Оскільки вимірювальні сигнали мають двополярну форму, а живлення МК є однополярним, для можливості вимірювання їх значення, вихідні сигнали давачів піднімаються на певний рівень за допомогою схем підняття рівня. МК, основними вузлами якого є ADC (Analog-to-digital converter, аналого-цифровий перетворювач) для зчитування сигналів давачів, SPI та UART для передачі сигналів до карти пам'яті КП, та через гальванічну розв'язку до персонального комп'ютера ПК, де відбуваються розрахунки по описаному вище алгоритму. Також передбачена можливість швидкої заміни КП, для аналізу декількох мереж.

### 3.2. Розробка схеми електричної принципової. Розрахунок елементів

Вимоги до низької вартості аналізатора, точності роботи та компактності вносять певні обмеження на реалізацію схемних вузлів та



підбір елементної бази. На основі цих обмежень буде проводитись розробка схеми електричної принципової.

Максимальні амплітуди та полярність вихідних сигналів давача напруги ДН (рис. 3.1 ) та давача струму ДС (рис. 3.1) залежать від параметрів аналого-цифрового перетворювача АЦП мікроконтролера МК (рис. 3.1). Таким чином розробка схеми електричної принципової має розпочатись з підбору МК з врахуванням наступних вимог: наявність послідовних інтерфейсів SPI та UART, двох АЦП - для можливості одночасного парного зчитування сигналів з ДН та ДС, таймера - для синхронізації роботи периферійних вузлів у реальному часі. На основі цих вимог виберемо 32-ох бітний мікроконтролер ARM Cortex M-3 STM32F103C8T6 (рис. 3.3) з наступними параметрами [7]:

- напруга живлення 3.3 В;
- максимальна робоча частота 72 МГц;
- 64 Кбайт flash пам'яті;
- 20 Кбайт SRAM;
- 2 12-бітних АЦП з можливістю парної роботи на частоті до 14МГц;
- 7 16-ти бітних таймерів;
- 2 SPI з швидкістю 18Мбіт/с;
- 3 USART.

Після вибору МК, розробимо схему давача напруги ДН, з наступними вимогами: двополярна вхідна напруга 220 В  $\pm 10\%$  ( $U_{вх}$ , рис 3.2), вихідний сигнал однієї полярності з максимальною амплітудою 3.3 В, низький вихідний опір ( $U_{вих}$ , рис. 3.2):

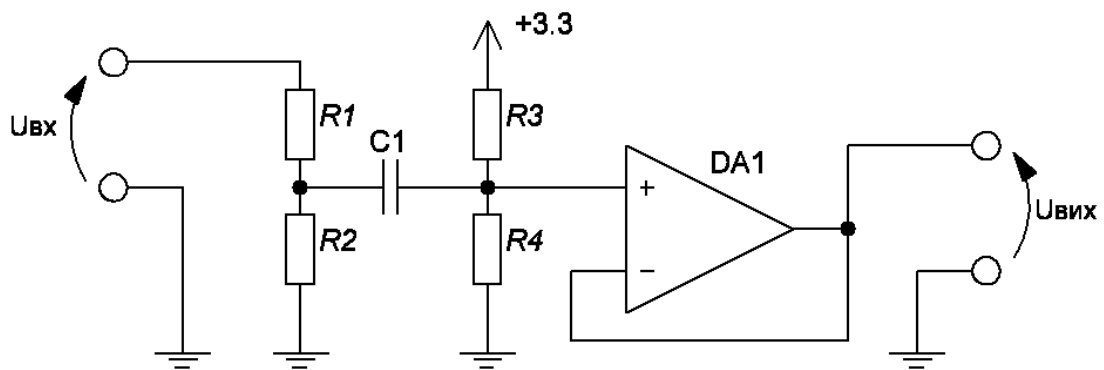


Рис. 3.2 Схема давача напруги ДН

Знаючи величини вхідних та вихідних сигналів напруги, для розрахунку елементів схеми застосуємо метод суперпозиції та сформуємо систему рівнянь провідностей:

$$\begin{cases} \frac{G_3}{G_3 + G_4} = \frac{1.65}{3.3}; \\ \frac{G_1 p C_1}{(G_1 + G_2)(G_3 + G_4) + p C_1 (G_1 + G_2 + G_3 + G_4)} = \frac{1.65}{311 + 31.1}. \end{cases}$$

Звідки випливає рівність опорів  $R_3 = R_4$ :

$$\begin{cases} G_3 = G_4; \\ \frac{G_1 p C_1}{2(G_1 + G_2)G_3 + p C_1 (G_1 + G_2 + 2G_3)} = 0.0048. \end{cases}$$

Використовуючи дані рівності, підберемо значення опорів для коректної роботи схеми:  $R_1 = 1.5 \text{ МОм}$ ,  $R_2 = 8 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = R_4 = 100 \text{ кОм}$ ,  $C_1 = 1 \text{ мФ}$ . Для перевірки правильності підбору номіналів елементів проведемо симуляцію роботи такої схеми в Simulink Matlab рис 3.3:

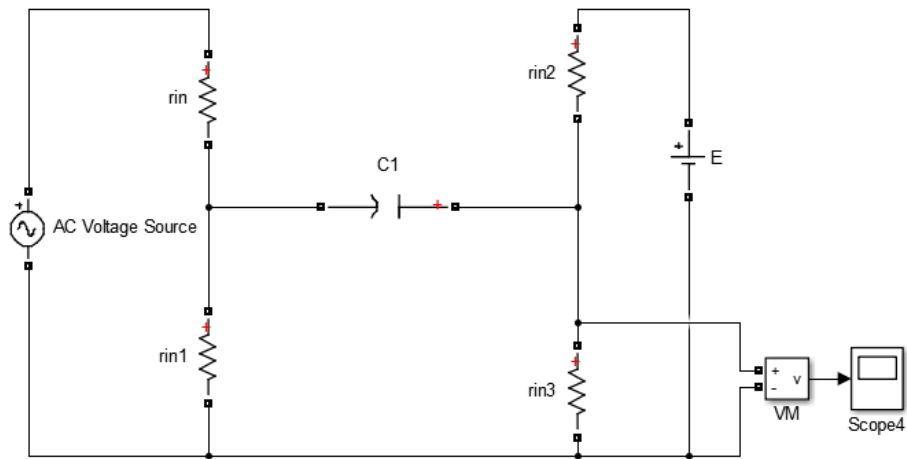


Рис. 3.3 Віртуальна модель давача напруги ДН

Зображення вхідного (а, рис. 3.4) та вихідного (б, рис. 3.4) сигналів зображено на рис. 3.4, де амплітуда вхідного сигналу (а, рис. 3.4) є рівною  $311\text{V}+10\%$ , а амплітуда вихідного сигналу не перевищує величину  $3.3\text{ V}$ , що свідчить про правильність розрахунків.

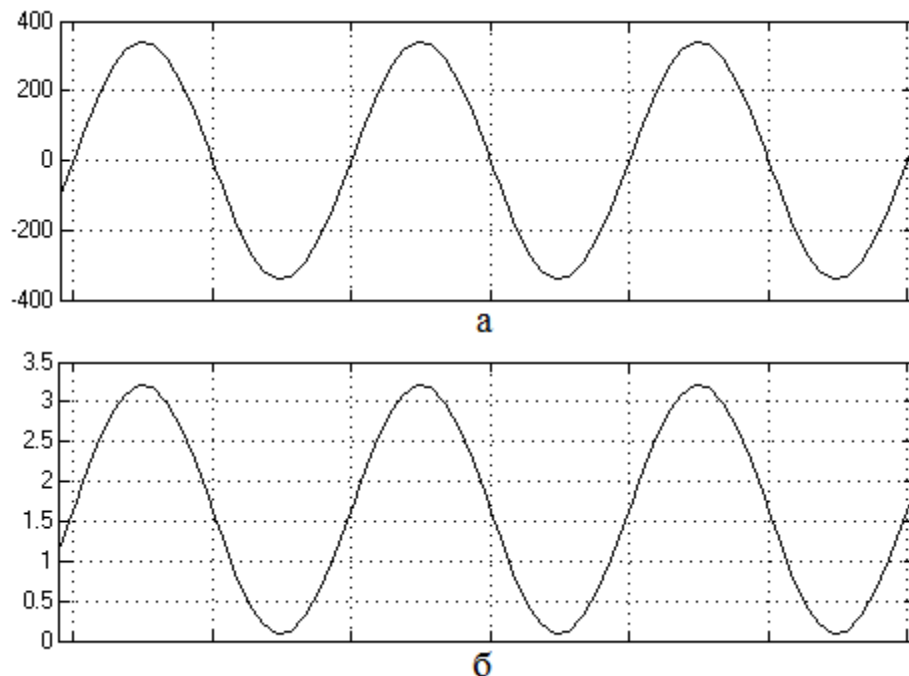


Рис. 3.4 Зображення а - вхідного та б – вихідного сигналу напруги ДН

Структурно давач струму зображений на рис. 3.1 складається з трансформатора струму, схеми підняття рівня та підсилювача. Використання

трансформатора струму дозволить не розривати лінію навантаження для його під'єднання.

Проведемо розрахунок трансформатора струму з наступними вхідними даними:

- частота  $f=50\ldots 60$  Гц;
- амплітудне значення струму  $I_m = 100$  А, форма –синусоїдальна;
- амплітудне значення вихідної напруги  $U_m = (3.3/2 + 0.3)$  В, де величина  $0.3$ В – запас на втрати у витках осердя.

Розрахунок трансформатора струму:

1. Кількість витків та параметри вихідного резистора.

Задамося потужністю у вихідному колі трансформатора  $P=1$ Вт, що обмежить величину виділення теплової енергії на вихідному резисторі.

Струм у вторинній обмотці:

$$I_{вих} = \frac{P}{U} = 0.513 \text{ А.}$$

Опір резистора:

$$R = \frac{U}{I_{вих}} = 3.803 \text{ Ом.}$$

Задамося кількістю витків первинної обмотки  $N_1=1$  виток, тоді кількість витків вторинної обмотки:

$$N_2 = I_{вх} \frac{R}{U} = 195 \text{ витків.}$$

2. Діаметри провідників

Обираємо щільність струму  $j = 3$  А/мм<sup>2</sup>. Тоді площі перерізу провідників складатимуть:

$$S_1 = \frac{I_{вх}}{j} = 33.33 \text{ мм}^2,$$

$$S_2 = \frac{I_{вих}}{j} = 0.155 \text{ мм}^2.$$

Розрахуємо діаметри провідників:

$$d_1 = \sqrt{4 \frac{S_1}{\pi}} = 6.515 \text{ мм},$$

$$d_2 = \sqrt{4 \frac{S_2}{\pi}} = 0.326 \text{ мм}.$$

### 3. Осердя трансформатора.

Матеріал фериту осердя трансформатора N87, виробник фірма Epcos. Осердя B64290L0638X087 тороїдального типу [38].

### 4. Оцінка можливості розміщення обмоток у вікні.

Зважаючи на площу вікна осердя  $S_B = \pi d^2/4 = 147,411 \text{ мм}^2$  та орієнтовне значення коефіцієнта заповнення вікна міддю  $k_B = 0.3$ . Максимальна кількість витків складає:

$$N = \frac{S_B - S_1}{S_2} k_B = 200 \text{ Вит.}$$

$$N_1 + N_2 < N.$$

### 5. Втрати в осерді трансформатора.

Розрахуємо масу фериту осердя трансформатора, для чого спочатку знайдемо об'єм осердя.

$$V = h \cdot \pi \frac{D^2 - d^2}{4} = 1.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3,$$

де  $h, D, d$  – параметри осердя [38].

$$m = V \cdot \rho = 0.007 \text{ кг.}$$

де густина  $\rho = 4850 \text{ кг/м}^3$  [38].

Втрати на перемагнічування осердя складатимуть:

$$P_{oc} = P_v \cdot m = 0.415 \text{ Вт.}$$

### 6. Втрати в провідниках:

Орієнтовна довжина одного витка:

$$l = 2 \cdot \left( \frac{D-d}{2} + h \right) \cdot 1.3 = 0.027 \text{ м.}$$

Опіри одного метра провідників відповідно діаметрам первинної та вторинної обмоток дорівнюють  $M_1 = 5.0 \cdot 10^{-4}$  ом/м,  $M_2 = 0.099$  ом/м [38].

Опори провідників:

$$r_1 = M_1 \cdot l_1 \cdot N_1 = 1.399 \cdot 10^{-5} \text{ Ом},$$

$$r_2 = M_2 \cdot l_2 \cdot N_2 = 0.532 \text{ Ом}.$$

Падіння напруги на провідниках:

$$U_2 = I_{\text{вих}} \cdot r_2 = 0.273 \text{ В},$$

$$U_1 = I_{\text{вх}} \cdot r_1 = 0.001 \text{ В}.$$

Таким чином при падінні напруги 0.273В запас напруги у 0.3В оправдано.

Сумарна величина потужності втрат у провідниках:

$$P_{\text{пр}} = I_{\text{вх}}^2 \cdot r_1 + I_{\text{вих}}^2 \cdot r_2 = 0.28 \text{ Вт}.$$

Розрахований трансформатор струму можна використовувати для побудови аналізатора ПЯЕ після розробки для нього корпусу, та проведення з ним експериментальних досліджень для калібрування, тому в рамках даного дослідження буде використано трансформатор струму SCT-013-000, що розраховано по описаній вище методиці [8].

Для узгодження сигналу напруги з датчика струму та МК використаємо схему зображену на рис. 3.5, де R1, R2, C1 – схема підняття рівня напруги, DA1, R3-10 та VT1-6 – схема підсилення, контакти ТС – під'єднання трансформатора струму, контакти МК – під'єднання до мікроконтролера.

Номінали елементів схеми підняття рівня візьмемо типовими для датчика струму (SCT-013-000) який використаємо для побудови дослідного макету [8]:  $R1 = R2 = 10 \text{ кОм}$ ,  $C1 = 0.1 \text{ мФ}$ .

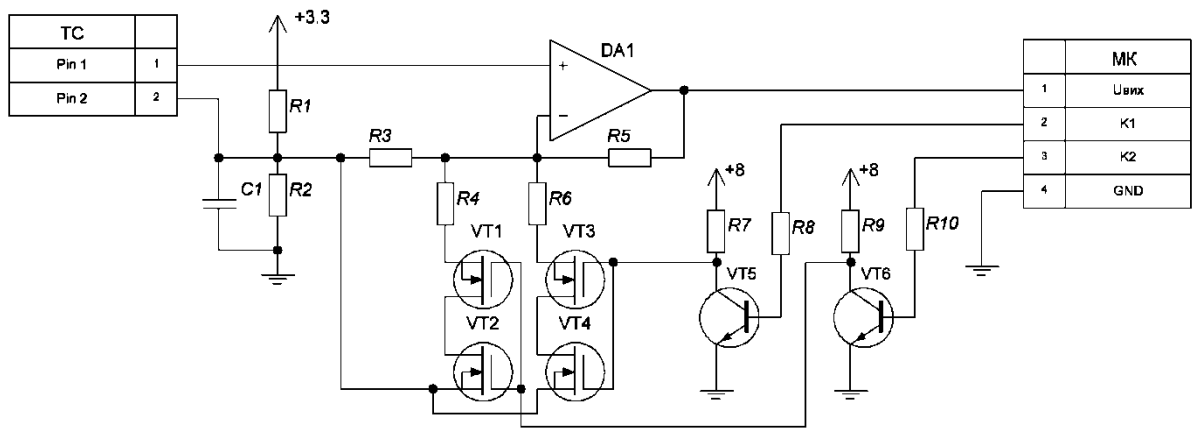


Рис. 3.5 Схема давача струму ДС

Параметри датчика:

- діапазон вимірювань 0...100 А;
- вихідний сигнал струму 50мА/100А;
- вихідний сигнал напруги 1В/100А.

Для дотримання заданої точності у 1% побудовано схему підсилення (рис. 3.5), для якої сформуємо діапазони вимірювання струму, з перекриванням у 10%:

1. від 100 до 10 А.
2. від 11 до 1 А.

Схему узгодження побудовано на неінвертуючій схемі ввімкнення ОП, де максимальна вхідна напруга рівна 1 В, а вихідна 3.3, а коефіцієнт підсилення за напругою для отриманих раніше діапазонів вимірювання струму:

$$1. \quad K_{U1} = 1 + \frac{R_5}{R_3} = 3.3;$$

$$2. \quad K_{U2} = 1 + \frac{R_5}{\frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4}} = 30.$$

Опір резистора що знаходиться між вихідним та інвертуючим вузлом ОП візьмемо типовим для даного типу операційного підсилювача (LM358N)

$R_5 = 1 \cdot 10^6 \text{ Ом}$ . Тоді  $R_3 = 4.348 \cdot 10^5 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 3.745 \cdot 10^4 \text{ Ом}$ . Резистор  $R_6$  необхідний для реалізації додаткового коефіцієнта підсилення.

Перехід з першого в другий діапазон відбувається при комутації транзисторів VT1, VT2, VT5, параметри яких є типовими для схем ключів МК.

Схему гальванічної розвязки UART побудовано на оптронах OC1, OC2 рис. 3.6. Транзистори VT1, VT2 використовуються в якості логічного НІ, адже вихідний сигнал на елементах OC1, OC2 є інвертованим:

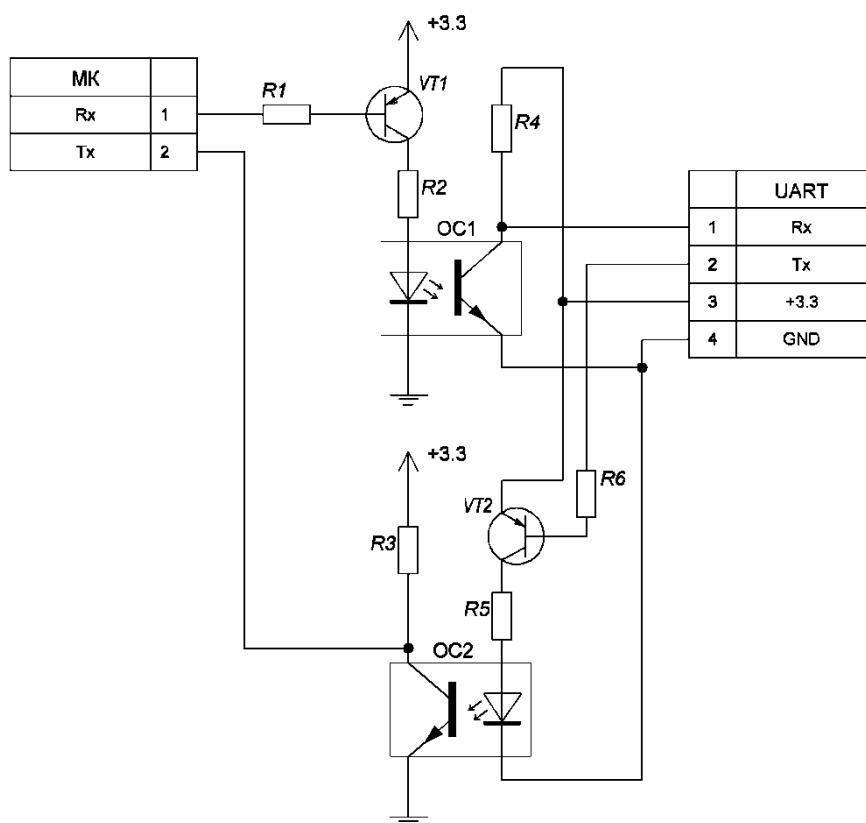


Рис. 3.6 Схема гальванічної розвязки UART

Розрахунок такої схеми (рис. 3.6) має розпочинатись з визначення параметрів оптронів OC1, OC2, основним з яких є можлива швидкість передачі. Так як інтерфейс UART буде використовуватись для передачі налаштувань, а основна інформація передається напряму до карти пам'яті, то достатньо буде швидкості у 9600 бод.

Виберемо оптрон серії EL817 з наступними параметрами [27]:



- прямий струм:  $I_{np} = 60\text{мА}$ ;
- зворотна напруга:  $U_{зв} = 6\text{ В}$ ;
- струм колектора:  $I_K = 50\text{ мА}$ ;
- напруга ізоляції:  $U_{із} = 5\text{ кВ}$ ;
- вхідна ємність:  $C_{вх} = 30\text{ пФ}$ ;
- тривалість переднього фронту:  $t_{Rise} = 6\text{-}18\text{ мкс}$ ;
- тривалість заднього фронту:  $t_{Fall} = 8\text{-}18\text{ мкс}$ ;
- падіння напруги:  $U_{VD} = 1.2\text{-}1.4\text{ В}$ .

Виберемо транзистори VT1, VT2 (рис 3.6), під описані вище параметри, серії BC856B з наступними параметрами [28]:

- частота роботи:  $f = 100\text{ МГц}$ ;
- напруга колектор-емітер:  $U_{KE} = 65\text{ В}$ ;
- напруга колектор-база:  $U_{BE} = 80\text{ В}$ ;
- струм колектора:  $I_K = 0.1\text{ А}$ ;
- коефіцієнт підсилення:  $h_{2I_{max}} = 475$ .

Згідно структурної схеми зображеної на рис. 3.1, та вказаних вище особливостей побудови схем зображених на рис. 3.2 – рис. 3.6, побудуємо схему аналізатора ПЯЕ електричну принципову (рис. 3.7) Вмикання аналізатора ПЯЕ зображеного на рис 3.7 відбувається перемиканням перемикача S1. Перемикач S2 відповідає за вибір одного з двох режимів роботи: «очікування» та «робота». В режимі «очікування» МК буде налаштовано на роботу з інтерфейсом передачі даних UART, через який користувач зможе змінювати налаштування параметрів роботи аналізатора. В режимі «робота» - буде виконуватись зчитування значень струму, напруги з датчиків та передача їх через послідовний інтерфейс SPI до карти пам'яті, запрограмованого часу. Живлення аналізатора побудовано на двонапівперіодному випрямлячеві з середньою точкою, реалізованому на трансформаторі TV1, діодах VD1, VD2, ємнісних фільтрах C3-C7, та лінійних перетворювачах DA3, DA4.



Таким чином розроблено схему електричну принципову аналізатора ПЯЕ, що дозволить в подальшому на основі схеми рис 3.7 розробити алгоритм керування, побудувати дослідний макет та печатну плату.

### **3.3. Розробка алгоритму роботи системи керування**

Наступним етапом після розробки схеми електричної принципової є розробка алгоритму роботи системи керування.

Після вмикання живлення перемикачем S1 (рис. 3.7), першими командами що будуть виконуватись є підготовка до роботи:

- ініціалізація частоти роботи мікроконтролера;
- налаштування послідовних інтерфейсів SPI та UART;
- налаштування режиму роботи ADC1 та ADC2 в режимі парної роботи (dual mode) з використанням DMA (ПДП – прямий доступ до пам'яті) та з запуском перетворення по таймеру;
- переривань на портах GPIO до яких під'єднано перемикач S2;
- налаштування таймера для запуску перетворення ADC.

Після підготовки до роботи розпочнеться виконання програми, відповідно до режиму роботи, який визначається положенням перемикача S2 (рис. 3.7):

- режим зчитування та збереження даних на карту пам'яті;
- режим очікування налаштувань.

Розглянемо детальніше кожен з режимів.

При переході в режим зчитування та збереження даних на карту пам'яті, відбувається ініціалізація карти пам'яті по наступному алгоритму (рис. 3.8) [29].

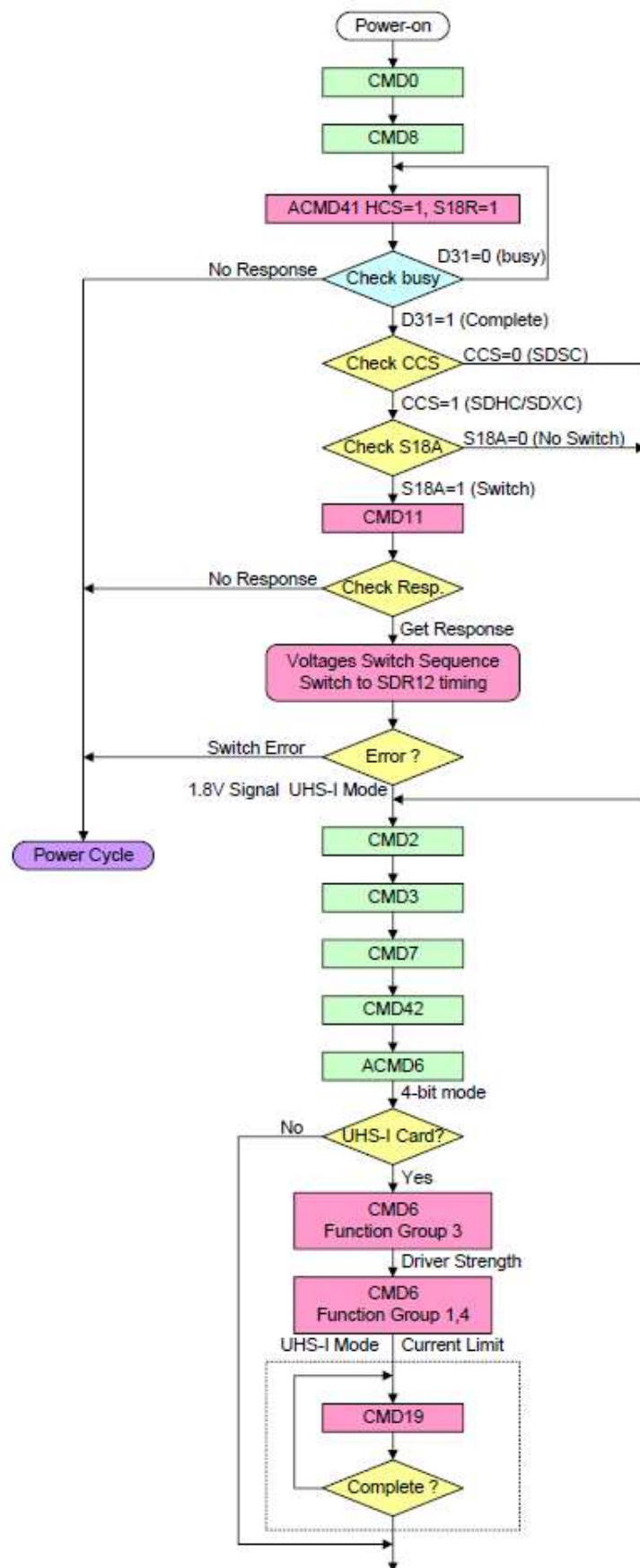


Рис. 3.8 Алгоритм ініціалізації карти пам'яті microSD

Під час виконання алгоритму відбувається перевід карти пам'яті з режиму роботи SD в режим SPI, визначення типу карти пам'яті, налаштування діапазону робочих напруг та струмів, частоти роботи.

Після виконання команд відповідно алгоритму зображеному на рис. 3.8, буде отримано наступні результати, та параметри:

1. Ініціалізація успішна, параметри:
  - тип карти пам'яті;
  - величина сектора та кластера.
2. Ініціалізація не успішна, параметрами є причина помилки:
  - карта пам'яті не наявна;
  - карта пам'яті не відповідає;
  - карта пам'яті невідомого типу.

Від типу карти пам'яті залежить діапазон робочих напруг, величина пам'яті, алгоритми ініціалізації, запису та зчитування даних (рис 3.8).

Після визначення типу КП, відбуватиметься процес зчитування даних з АЦП через проміжки часу визначені таймером, та запис даних у вільні кластери КП. Зчитування та передача даних з АЦП відбувається за допомогою двох буферів, які по заповненню передаються до карти пам'яті. Процес запису та зчитування даних виконуватиметься протягом часу вказаного в налаштуваннях або доки карту пам'яті не буде заповнено.

При переході в режим очікування налаштувань (перемикач S2, рис 3.7), відбувається зупинка зчитувань даних з АЦП та зупинка їх запису, та максимального пріорітету набувають переривання від надходження даних по UART. Процес зміни налаштувань полягає в надсиланні параметрів з їх значенням, тобто якщо потрібно змінити частоту зчитувань даних на якусь іншу частоту  $f$ , то надсилається назва параметра «frequency» та число  $f$ . За час аналізування відповідатиме параметр «time». Також можливим є запит значень налаштувань, що відбувається командою «setup».

На основі описаного вище сформуємо алгоритм роботи аналізатора (рис. 3.9), де 1 - режим очікування налаштувань, 2 - режим зчитування та збереження даних на карту пам'яті:

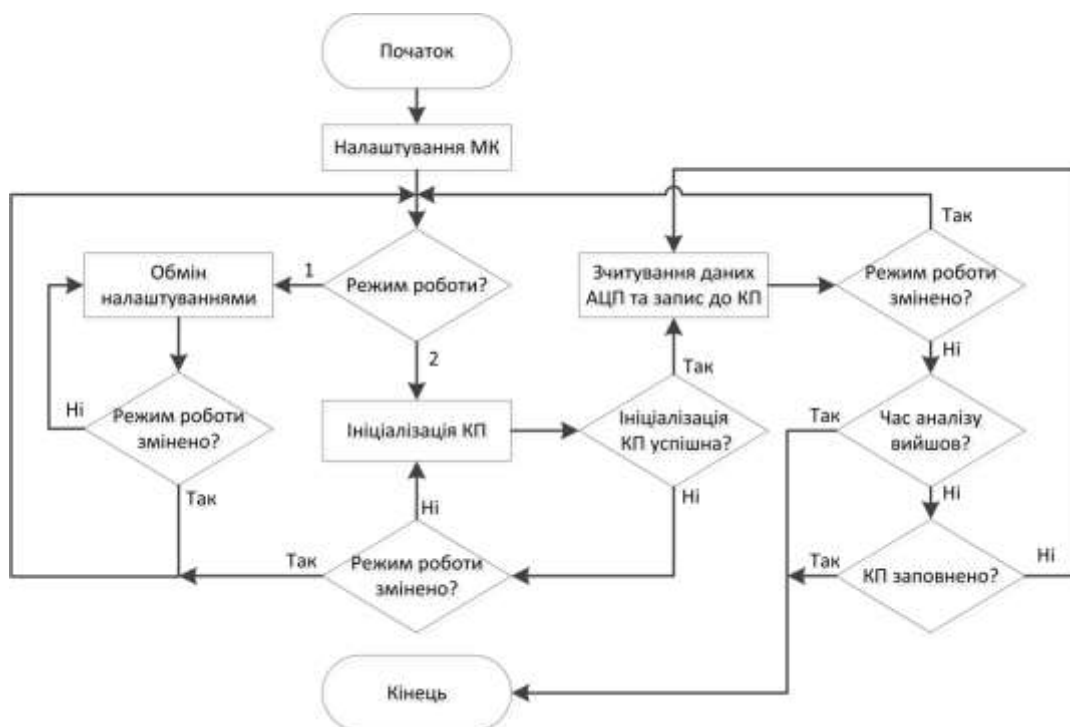


Рис. 3.9 Алгоритм роботи аналізатора

### 3.4. Розробка друкованої плати

Розробка друкованої плати буде проводитись за допомогою багатофункціональної САПР DipTrace. На першому етапі виконується перенесення схеми електричної принципової (рис. 3.7) до DipTrace Schematic (рис. 3.10) [30]:

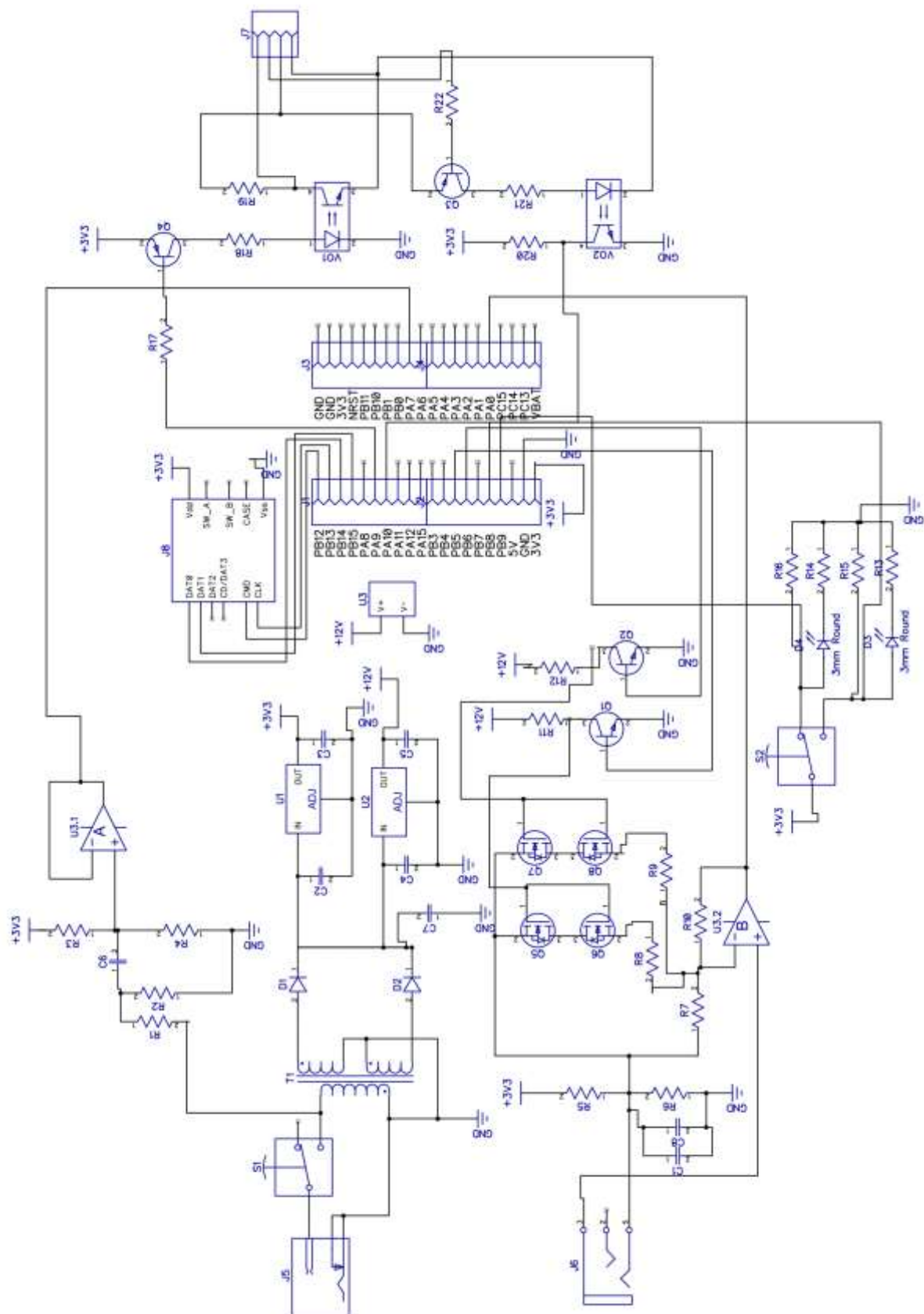


Рис. 3.10 Схема анализатора в САПР DipTrace Schematic

Наступним етапом після перенесення схеми електричної принципової в САПР DipTrace Schematic, є розміщення елементів на платі за допомогою редактора плат DipTrace, трасування з'єднань. Перший та другий шар доріжок друкованої плати аналізатора виглядатимуть наступним чином (рис. 3.11, рис. 3.12).

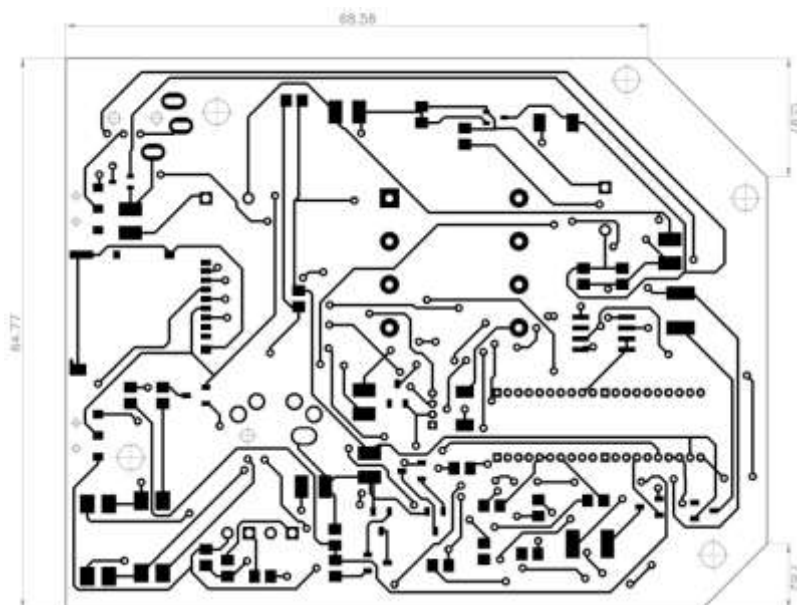


Рис. 3.11 Перший шар друкованої плати аналізатора

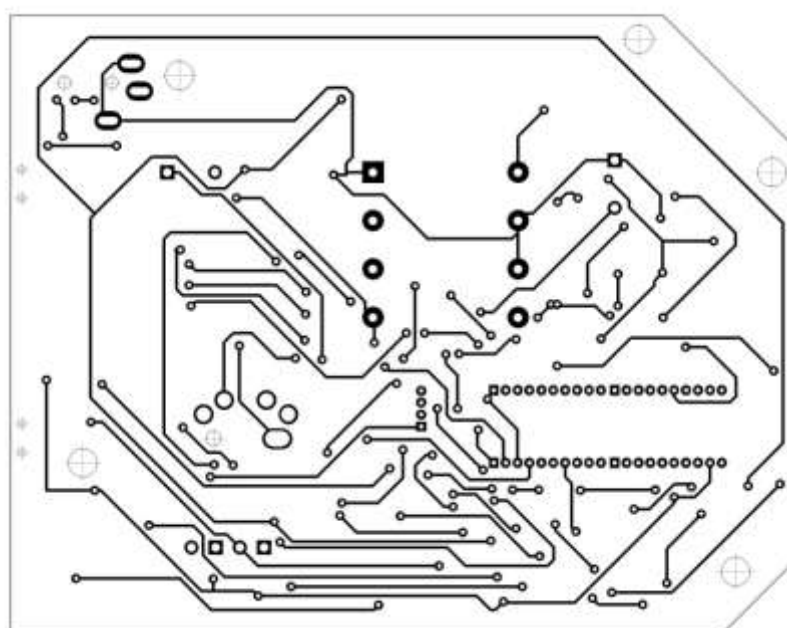


Рис. 3.12 Другий шар друкованої плати аналізатора



Розміщення електричних елементів на друкованій платі аналізатора, а також габаритні розміри (рис. 3.13).

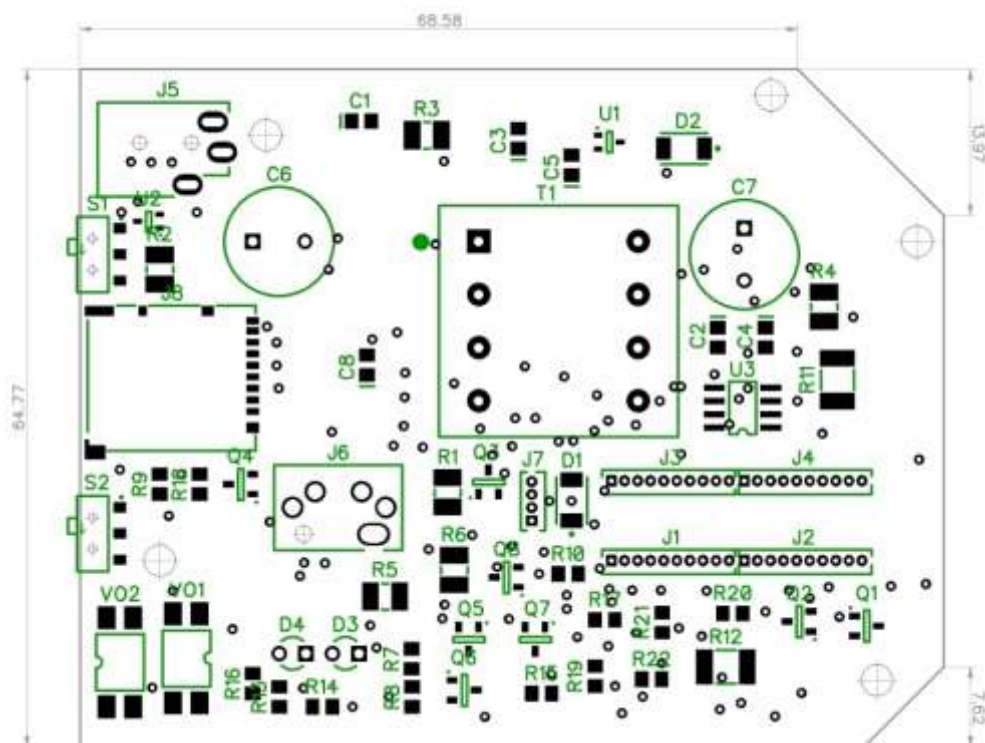


Рис. 3.13 Розміщення електричних елементів на друкованій платі аналізатора

Використання САПР DipTrace при побудові друкованих плат дає можливість перегляду отриманої плати у 3D вигляді (рис. 3.14).

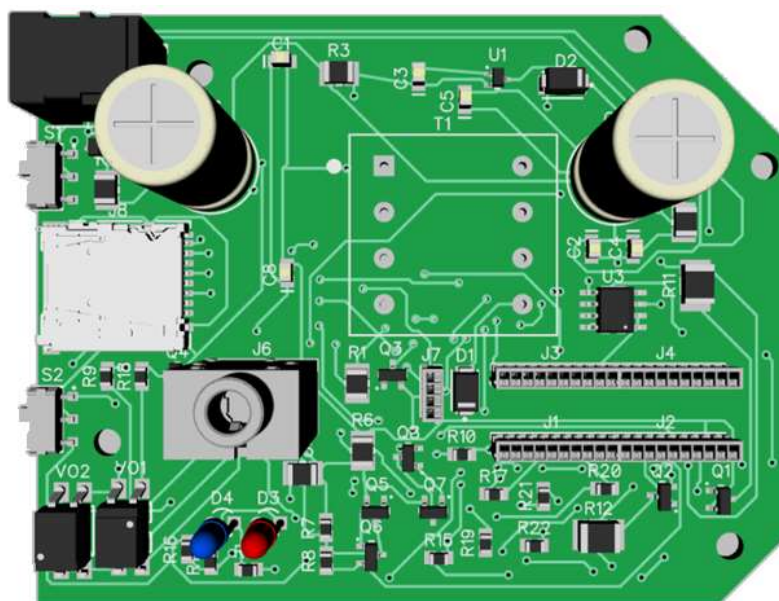


Рис. 3.14 3D вигляд побудованої друкованої плати аналізатора

Таким чином було розроблено двосторонню друковану плату аналізатора параметрів якості електроенергії, з наступними габаритними розмірами: ширина 6 см, висота 7 см. Діаметр кріпильних отворів 4 мм. Необхідна висота для корпусу складає 4 см.

### **Висновки до розділу 3:**

1. Визначено вимоги до побудови структури аналізатора ПЯЕ.
2. Побудовано структурну схему аналізатора ПЯЕ по визначеним вимогам.
3. Проведено розробку схеми електричної принципової та розрахунок елементів, з частковим моделюванням роботи окремих вузлів.
4. Розроблено алгоритм роботи системи керування.
5. Спроектовано друковану плату аналізатора ПЯЕ.

## 4. ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1. Побудова дослідного макету аналізатора ПЯЕ

В якості основи для побудови макету аналізатора параметрів якості електроенергії, використано макетну плату розміром 9\*15см (рис. 6.1). Систему керування побудовано на відлагоджувальній платі STM32 (рис. 4.1, № 6).

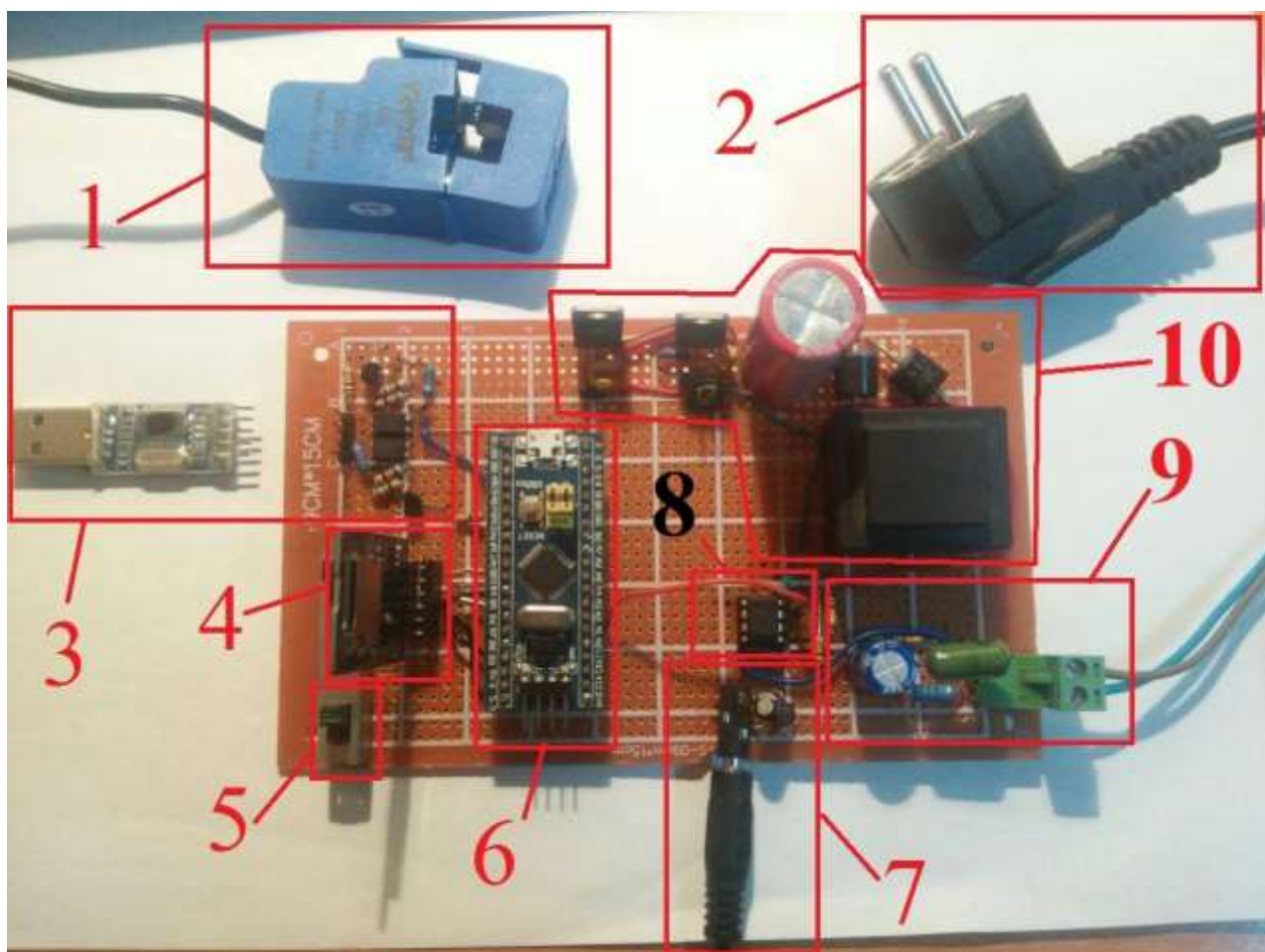


Рис. 4.1. Зображення макету аналізатора ПЯЕ

На рис. 4.1 зображено:

1 – Датчик струму SCT – 013 – 000;

- 2 – Роз’єм під’єднання живлення;
- 3 – Перетворювач інтерфейсів USB – UART та гальванічна розв’язка;
- 4 – MicroSD адаптер, для під’єднання карти пам’яті КП;
- 5 – Перемикач режимів роботи;
- 6 - Відлагоджувальна плата STM32;
- 7 – Роз’єм датчика струму та схема вимірювання струму;
- 8 – Операційний підсилювач ввімкнений за схемою неінвертуючого підсилювача;
- 9 – Роз’єм під’єднання живлення та схема вимірювання напруги;
- 10 – Схема живлення макету, побудована на випрямлячі з середньою точкою, ємнісному фільтрі та двох лінійних стабілізаторах напруги з виходами 3.3 та 10 В.

Для дослідження роботи побудованого макету в якості навантаження використаємо нелінійне навантаження, осцилограми сигналів струму (рис. 4.3) та напруги (рис. 4.2) нелінійного навантаження на виході давачів струму та напруги.

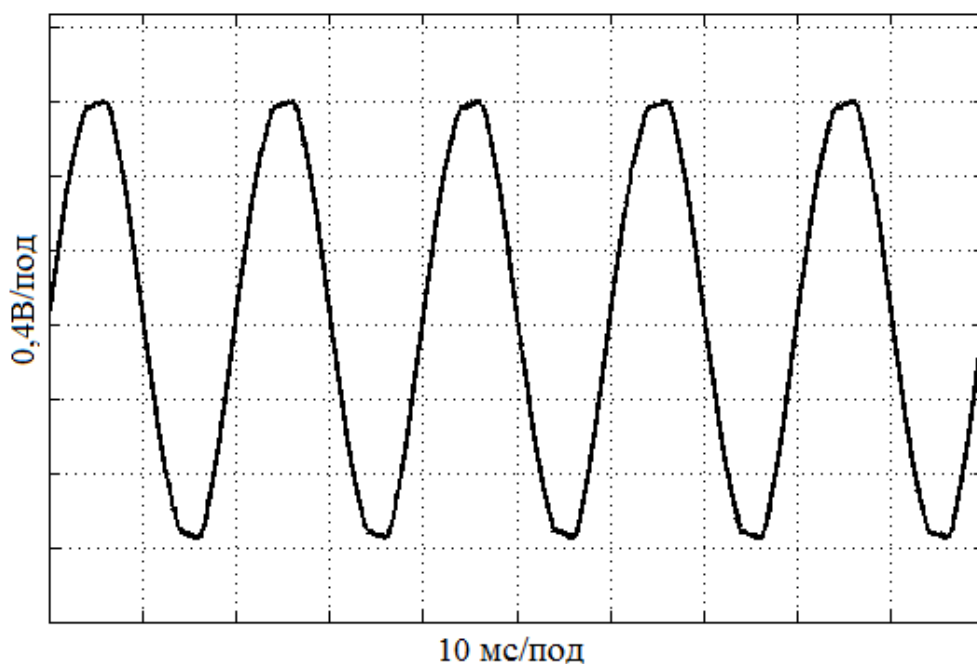


Рис. 4.2 осцилограма на виході давача напруги аналізатора

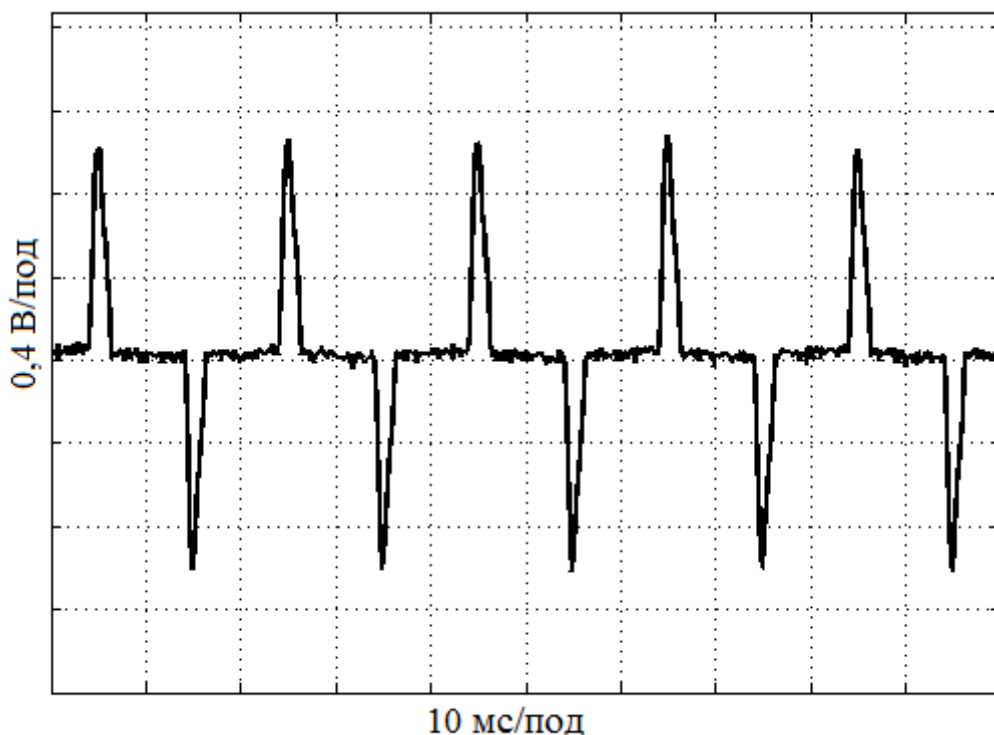


Рис. 4.3 осцилограма на виході давача струму аналізатора

По отриманим осцилограмам (рис. 4.2, рис 4.3) видно що сигнали однієї полярності, по амплітуді не перевищують максимально допустиму напругу величиною 3.3 В, рівень нуля піднятий на 1.65 В, що свідчить про правильність побудови дослідного макету.

В режимі аналізу напруги та струму, аналізатор зчитує одночасно дані з двох АЦП та виконує їх збереження послідовно у два буфера розмірами по 8192 байт, які по мірі заповнення надсилаються через SPI до карти пам'яті. Розмір буферів вибраний максимально можливим для даного мікроконтролера STM32F103C8T6, для можливості реалізації багатосекторного запису, що значно ефективніша порівнюючи з одно секторним записом (розмір сектора карти пам'яті 512 байт). Зчитування даних відбувається з фіксованою частотою 10 кГц. Процес запису даних проілюстровано на рис. 4.4:

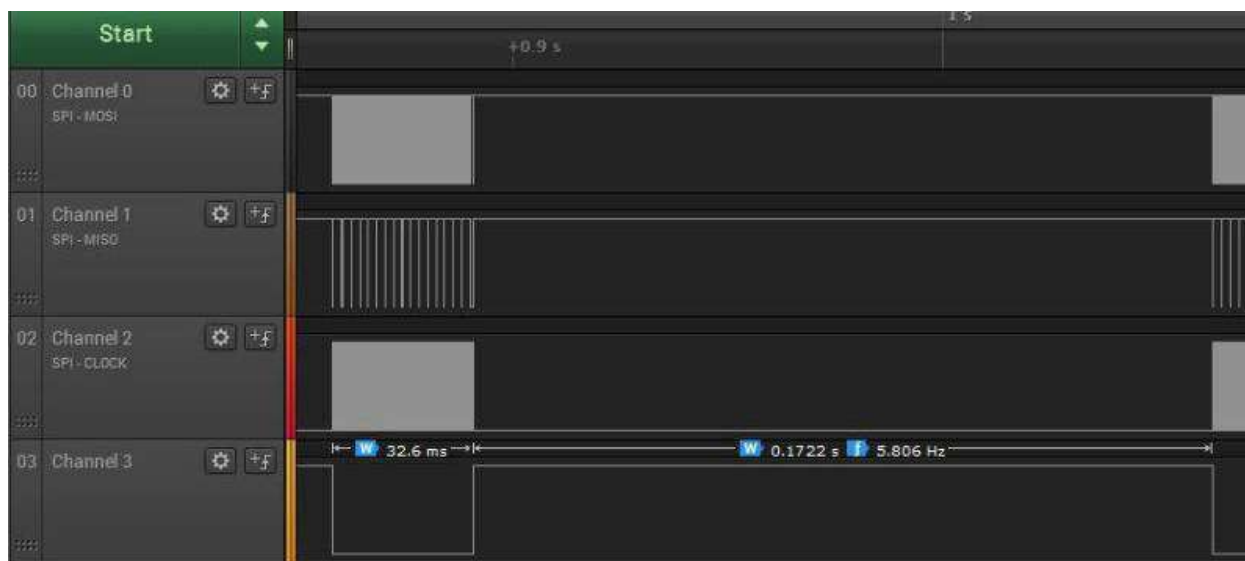


Рис. 4.4 осцилограма запису даних на карту пам'яті через інтерфейс SPI

Згідно зображень на рис. 4.4 осцилограмі запису даних на карту пам'яті, процес запису даних розміром 8192 байт триває 32.6 мс, та відбувається з періодом 204.8 мс. Тривала пауза величиною 172.2 мс необхідна для передбачення типових затримок відповіді карт пам'яті, що в даному дослідженні тривала більше 100 мс.

## 4.2. Підбір типу та параметрів компенсатора

При визначенні економічного ефекту  $E$  (формула 10) невідомими є коефіцієнт пропорційності  $k_{II}$  та витрати на купівлю й експлуатацію компенсатора  $C_K$ . Визначення яких можливе лише при аналізі вартості представлених на ринку генераторів відносно їх потужності, а також компенсаторів відносно їх типу та потужності.

Для даного дослідження використовуватимуться апроксимовані вартісні залежності (рис. 4.5), отримані при аналізі ринкової вартості.

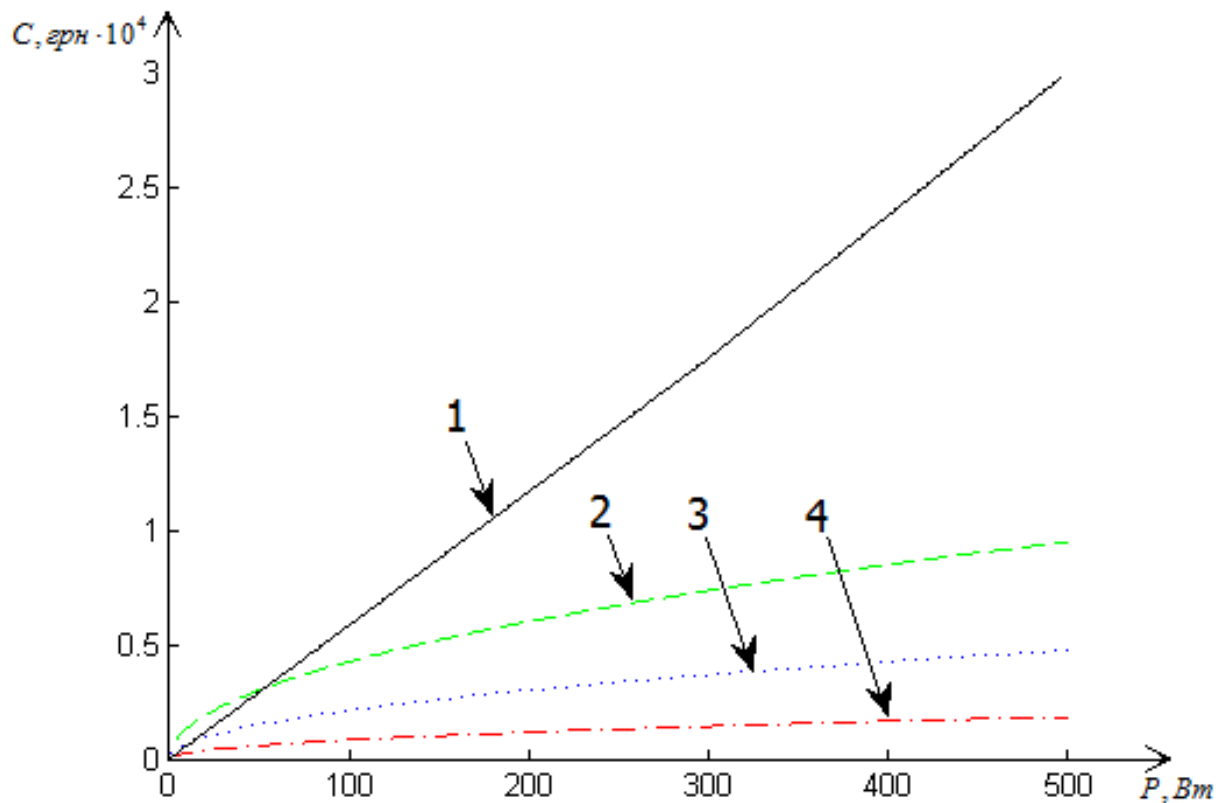


Рис. 4.5 Залежності вартості 1 – генератора, 2 – активного фільтра з динамічним керуванням, 3 – активного фільтра, 4 – статичного компенсатора, від їх потужності

Для дослідження запропонованої методики, за допомогою розробленого по структурній схемі (рис. 3.1) аналізатора ПЯЕ, було проведено аналіз мережі, з чотирма видами навантаження (а, б, в, г, рис. 4.6), форми струмів та напруг яких зображено на рис. 4.6.



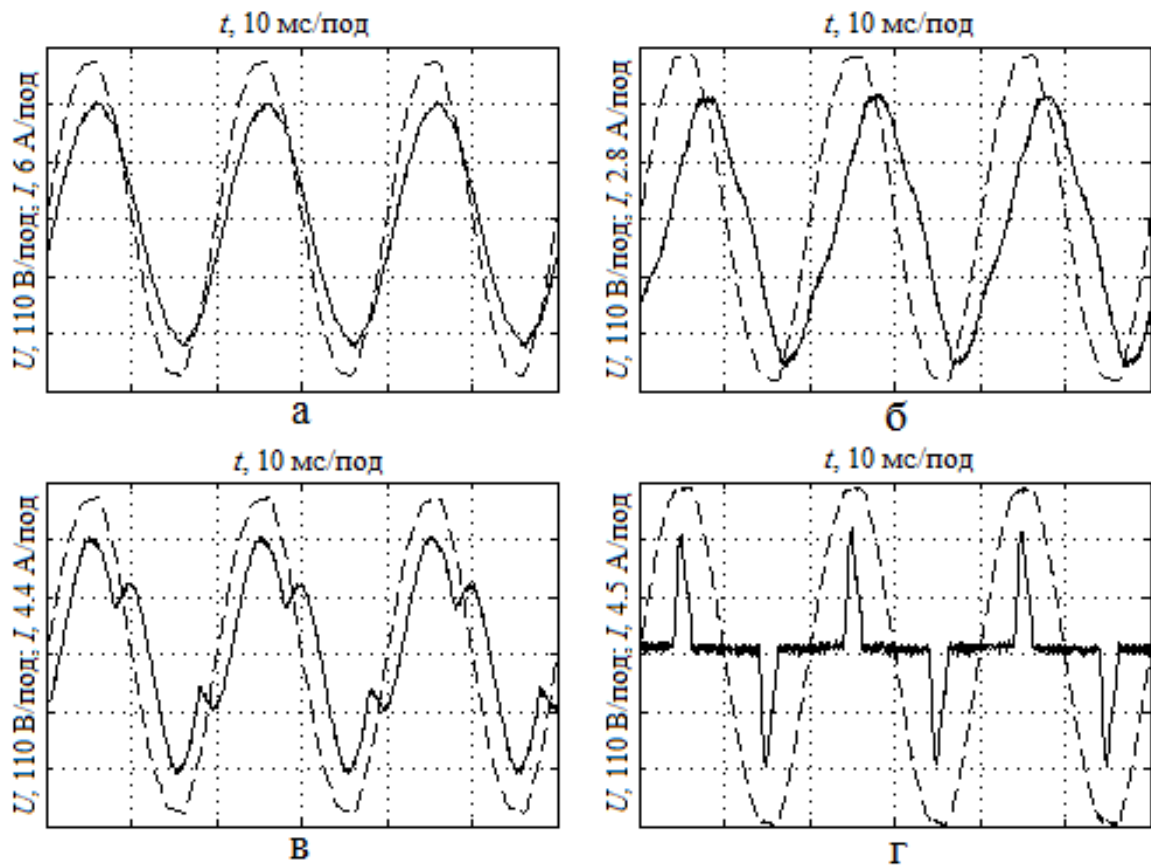


Рис. 4.6 Осцилограми струму ‘--’ I та напруги ‘--’U досліджуваних навантажень, де а – лінійне активне, б – лінійне активно - індуктивне, в – нелінійне активно - індуктивне, г – динамічне активно - ємнісне

За допомогою реалізованого у Matlab описаного в статті алгоритму, для навантажень з характером споживаного струму зображеним на рис. 4.3, було отримано наступні результати (табл. 4.1, табл. 4.2 ).

Таблица 4.1

Результати розрахунків

Етапи алгоритму	Характер навантаження, №	
	лінійне активне	лін. активно-індуктивне
1	$K_P = 0,96$	$K_P = 0,65$
2	$K_P > 0,95$	$K_P < 0,95$
3	-	$K_\Gamma = 0,1813$
4	-	$K_\Gamma < 0,3287$
5	-	-
	-	-



Таблиця 4.2

## Результати розрахунків

Етапи алгоритму	Характер навантаження, №	
	нелін. активно-інд.	динамічне активно-ємн.
1	$K_P = 0,91$	$K_P = 0,59$
2	$K_P < 0,95$	$K_P < 0,95$
3	$K_G = 0,425$	$K_G = 1,3895$
4	$K_G > 0,3287$	$K_G > 0,3287$
5	$W_I = 0,05$	$W_I = 0,15$
	$W_U = 0,03$	$W_U = 0,03$

На основі даних наведених у табл. 4.1 та табл. 4.2 можна зробити наступні висновки:

- лінійне активне навантаження – не потребує встановлення компенсатора;

- лінійне активно - індуктивне навантаження – потребує встановлення статичного компенсатора;

- нелінійне активно - індуктивне навантаження – потребує встановлення активного фільтра;

- динамічне активно - ємнісне навантаження – потребує встановлення активного фільтра.

Наступним етапом після вибору типу компенсатора є визначення його потужності, що проводитиметься на основі розрахунку економічного ефекту (2.9) та (2.10) для різних потужностей компенсатора при тривалості експлуатації протягом 7-ми років.

Отримані результати наведено на рис. 4.7, рис. 4.8, рис. 4.9, рис. 4.10 та рис. 4.11.

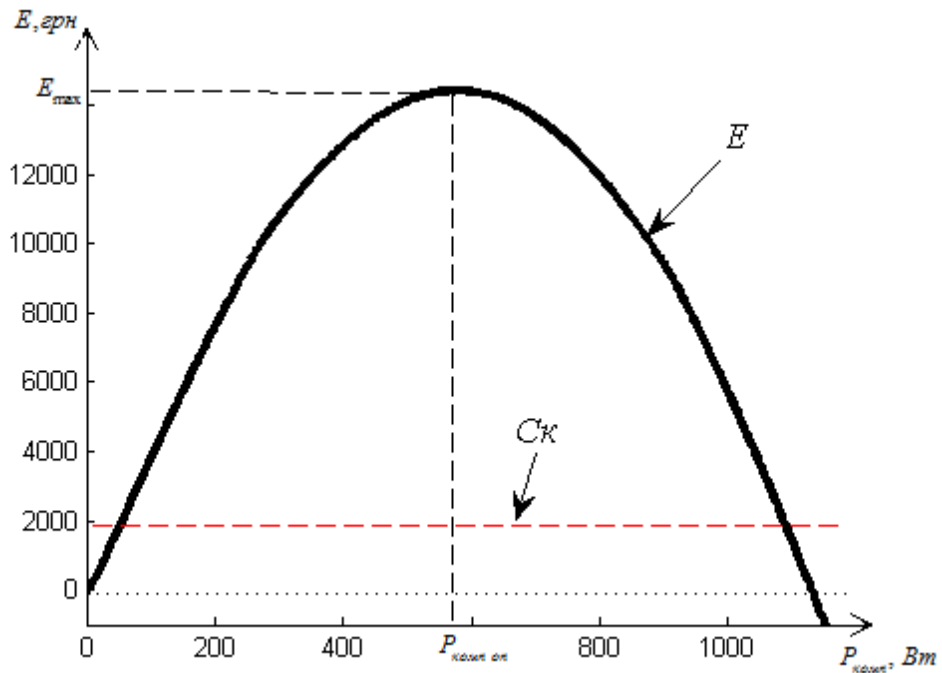


Рис. 4.7 економічний ефект при встановленні статичного компенсатора для лінійного активно-індуктивного навантаження

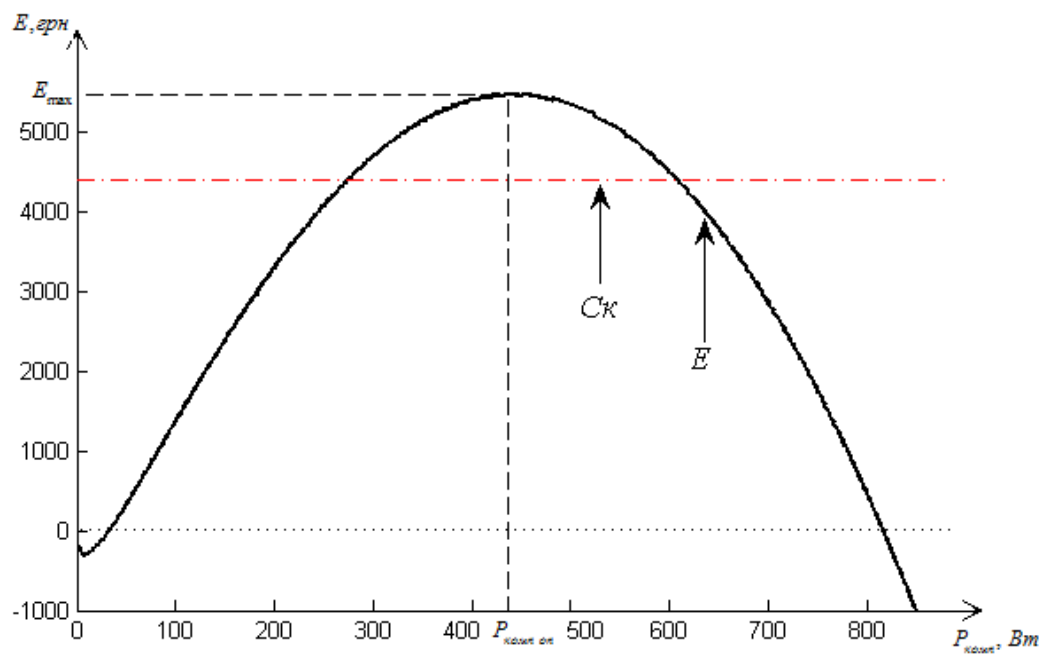


Рис. 4.8 Економічний ефект при встановленні активного фільтра для нелінійного активно-індуктивного навантаження

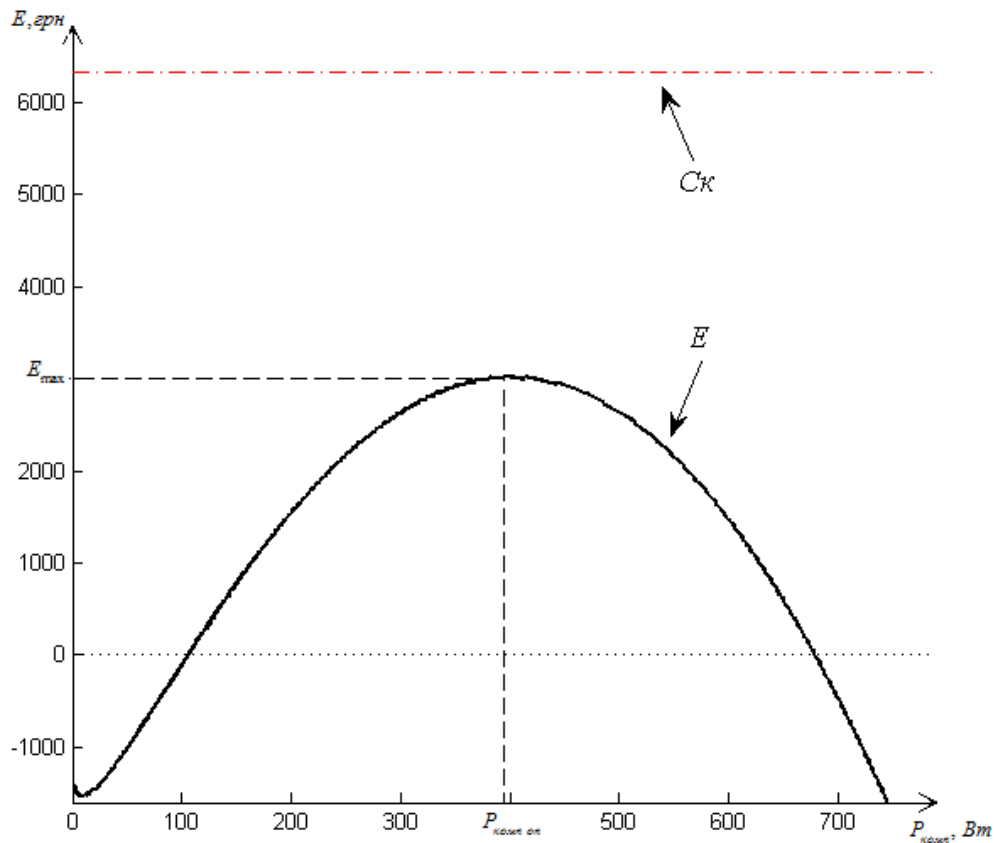


Рис. 4.9 Економічний ефект при встановленні активного фільтра з динамічним керуванням для нелінійного активно-індуктивного навантаження

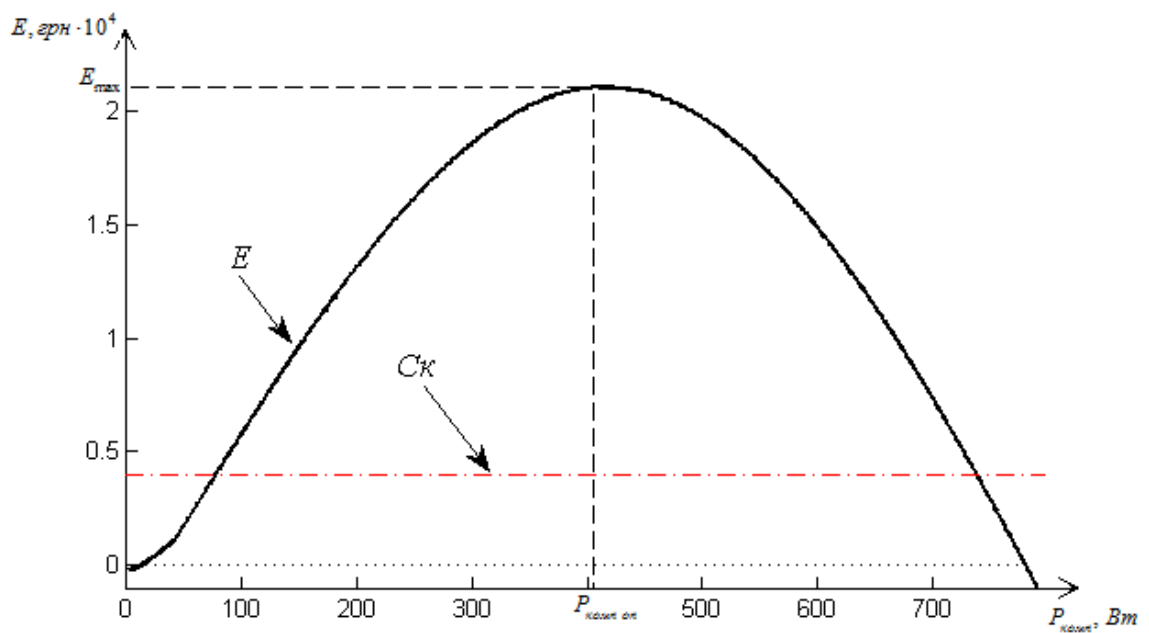


Рис. 4.10 Економічний ефект при встановленні активного фільтра для динамічного активно-ємнісного навантаження

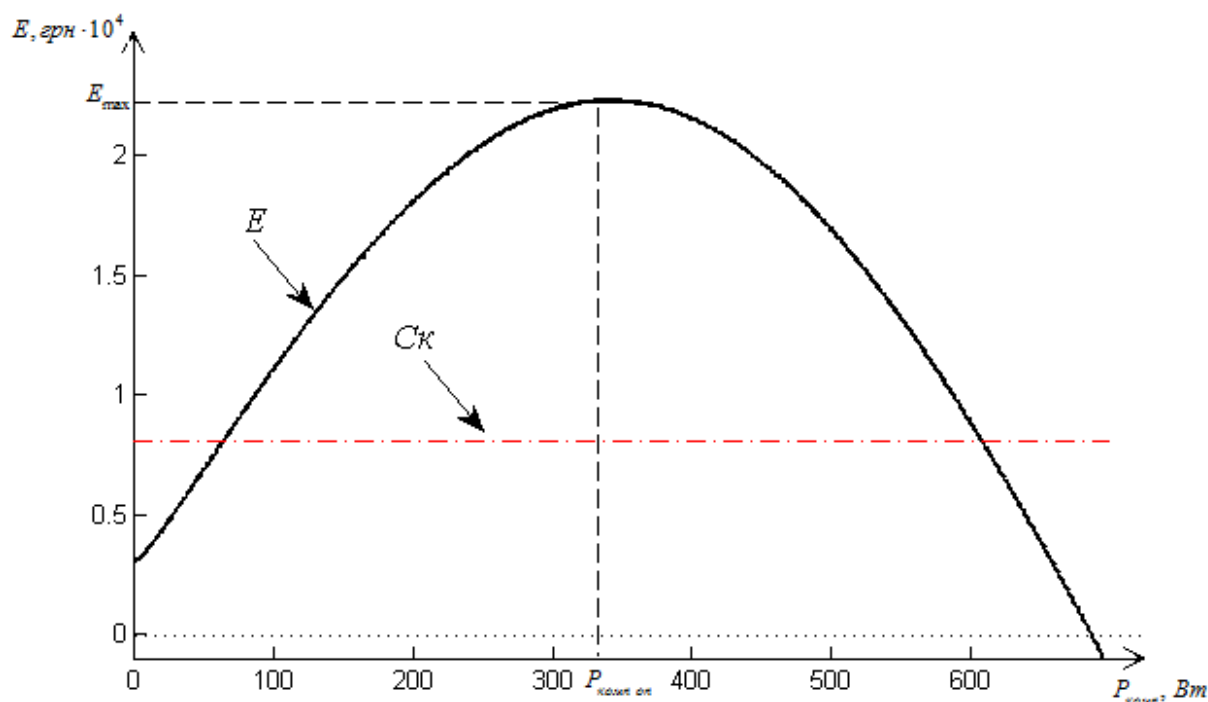


Рис. 4.11. Економічний ефект при встановленні активного фільтра з динамічним керуванням для динамічного активно-смісного навантаження

Для точнішої оцінки економічного ефекту  $E$  відносно вартості компенсатора  $C_K$  по зображеним вище рис. 4.7 – рис. 4.11, розрахуємо щорічний економічний ефект  $E_{\%}$  відносно початкової вартості компенсатора, та величину коефіцієнта потужності при встановленні компенсатора потужністю  $P_{\text{комп.оп}}$  (табл. 4.3):

Таблиця 4.3

Результати розрахунків

Рис №	$E_{\text{max}}$ , грн	$C_K$ , грн	$E_{\%}$ , %	$K_P$
Рис 4.4	14498	1985	104.3	0.9842
Рис 4.5	5521	4415	17.9	0.9993
Рис 4.6	3005	6377	6.7	0.9999
Рис 4.7	20954	4357	68.7	0.9728
Рис 4.8	22067	7053	44.7	0.9999

На основі зображених вище рис. 4.7 – рис. 4.11, та табл. 4.3. можна зробити наступні висновки:

- на кожному з рис 4.7 – рис 4.11, економічний ефект  $E$  має свій максимум  $E_{max}$  при потужності компенсатора  $P_{комп оп}$ , яка є оптимальною. Тому вибір потужності компенсатора має проводитись з врахуванням оцінки економічного ефекту;

- для нелінійного активно – індуктивного навантаження економічний ефект  $E_{max}$  та відносний економічний ефект  $E\%$  більший при встановлені активного фільтра без динамічного керування, що пояснюється незначною величиною ваги перехідних процесів;

- для динамічного активно – ємнісного навантаження економічний ефект  $E_{max}$  більший при встановлені активного фільтра з динамічним керуванням, адже характер споживаного струму містить значну вагу перехідних процесів. Але відносний економічний ефект  $E\%$  більший при використанні активного фільтра без динамічного керування, що пояснюється нижчою вартістю  $C_K$  відносно активного фільтра з динамічним керуванням.

#### **Висновки до розділу 4**

1. Побудовано дослідний макету аналізатора параметрів якості електроенергії, проведено дослідження його роботи.

2. Проведено аналіз чотирьох типів навантажень використовуючи дослідний макет.

3. Визначено параметри якості електроенергії для різного виду навантаження.

4. Проведено аналіз доцільності використання компенсаторів для мережі з досліджуваними типами навантаження.

## 5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

### 5.1. Опис ідеї проекту

У сучасній економічній ситуації залучити увагу інвесторів стає все складніше: інвестиційний рейтинг країни в кризових умовах не привабливий. Пріоритетними галузями інвестування як і раніше є: видобуток і переробка корисних копалин, будівництво, велике виробництво, інновації. При оцінці ефективності інвестиційного проекту ступінь точності і достовірності фінансової інформації підвищується в міру розвитку життєвого циклу. На початковому етапі будь-якого проекту доцільно проводити його експрес-оцінку. Особливо важливо оцінити потенціал інвестування на етапі формування ідеї і розробки попереднього техніко-економічного обґрунтування (ТЕО), або бізнес-плану проекту. Експрес-методи засновані на використанні традиційних інструментів дисконтування грошових потоків, які можна застосувати для відсіву економічно неефективних з великого числа проектів, що розглядаються інвестором, наприклад, в разі конкурсу або реалізації цільової програми. У цьому випадку проводиться елементарна порівняльна критеріальна оцінка показників розглянутого проекту з пріоритетами інвестора. Для більш глибокого і детального аналізу і розвитку прогнозу грошових потоків будь – якого проекту як автор, так і інвестор можуть використовувати інструментальні засоби інвестиційної оцінки, що спрощують і прискорюють роботу, наприклад, Prime Expert або Project Expert. Якщо автор проекту буде керуватися інформацією, що стосується прогнозів в даній галузі, зможе знайти вихідні дані, які застосовуються при затратно-відновлювальному методі, то попередній фінансовий розрахунок проекту буде адекватним запитом інвестора до дисконтованих показників [31].

З іншого боку, при всій простоті визначення витратної частини проекту складно говорити про достовірність даних, що стосуються дохідної частини. Визначити ціну продукту, а також його планований обсяг продажів можна, виходячи з проектної потужності технічного боку проекту, яка визначається витратною частиною. Однак ринкові реалії можуть виявитися зовсім іншими в порівнянні із запланованими обсягами виробництва. Ринкові дослідження та прогноз кон'юнктури знижують ступінь ризику [31].

На першому етапі маркетингового аналізу перспектив реалізації запропонованих у попередніх розділах науково – технічних рішень та можливостей їх ринкового впровадження, проведемо опис ідеї стартап – проекту (табл. 5.1).

Таблиця 5.1.

Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка аналізатора параметрів якості електричної енергії з програмним забезпеченням, для вибору типу та потужності компенсатора реактивної потужності з максимальним економічним ефектом	Системи контролю якості якості електроенергії. Енергозбереження та енергоефективність.	Визначення параметрів якості електроенергії. Вибір типу та потужності компенсатора з попередньою оцінкою економічного ефекту.

Після чіткого визначення змісту ідеї, напрямків застосування та вигоди для користувача, необхідно оцінити сильні, слабкі та нейтральні характеристики ідеї проекту (табл. 5.2), адже це є основою для визначення конкурентоспроможності. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик проекту відбуватиметься на основі порівняння техніко-економічних характеристик ідей з трьома конкурентами [32].

Таблиця 5.2.

Сильні, слабкі та нейтральні характеристики ідеї проекту

№ п/ п	Техніко- економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W слабка сторона	N нейтра- льна сторона	S сильна сторона
		Мій проект	Конку рент1	Конку рент2	Конку рент3			
1.	Визначення ПЯЕ	+	+	+	+		+	
2.	Визначення вмісту інтергармонік	+	+	-	-			+
3.	Час безперервного аналізу більше 24 – годин, без усереднення вимірювальних даних	+	-	-	-			+
4.	Визначення типу та потужності компенсатора	+	-	-	-			+
5.	Можливість аналізу трифазних мереж	-	+	+	+	+		
6.	Мобільність	+	+	+	-			+
7.	Низька вартість	+	-	-	-			+
8.	Наявність гнучкого програмного забезпечення	+	-	-	-			+

В порівнянні з трьома конкурентами [32], сильними сторонами є (табл. 5.2):

- Наявність гнучкого програмного забезпечення;
- Низька вартість та мобільність;
- Тривалий час аналізу та визначення вмісту інтергармонік;
- Можливість визначення типу та потужності компенсатора.



## 5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Після опису ідеї проекту потрібно провести технологічний аудит ідеї стартап – проекту, що являє собою визначення технології для реалізації ідеї. Та також складатиметься з визначення наявності технології та її доступності (табл. 5.3) [33].

Таблиця 5.3.

Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Аналізування параметрів якості електричної мережі	Побудова схемо-технічних рішень, дослідження	Наявна	Доступна
2.	Визначення типу та потужності компенсатора	Побудова алгоритму, дослідження	Наявна	Доступна

Згідно табл. 5.3 необхідні технології для побудови схемо – технічних рішень, а також проведення наукових досліджень, для реалізації ідеї проекту є доступними та наявними.

Перед визначенням потенційних клієнтів, проводиться аналіз ринкових можливостей для реалізації проекту (табл. 5.4), що розпочинається з визначення кількості основних гравців, загального обсягу продаж, динаміки ринку, наявності обмежень для входу, специфічних вимог для стандартизації та сертифікації, визначення середньої норми рентабельності в галузі. Перераховані показники визначають наявності попиту, динаміку розвитку ринку та його обсягу [34].

Таблиця 5.4.

## Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	20
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	100000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Поступово зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Масове розповсюдження брендових виробників
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Згідно з ДСТУ
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	80

За попереднім оцінюванням (згідно даним табл. 5.4), ринок є привабливим для входження.

Після визначення характеристик ринку проводять аналіз характеристик потенційних клієнтів проекту (табл. 5.5).

Таблиця 5.5.

## Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
----------	--------------------------	--	---	-----------------------------

1	Збільшення економічної ефективності та параметрів якості електроенергії	Підприємства з наявними нелінійними динамічними споживачами електроенергії	Стандартизовані показники ПЯЕ. Висока вартість компенсаторів	- достовірність визначених параметрів - можливість переналаштування
---	---	--	--	---

Наступним етапом після опису потенційних клієнтів є аналіз ринкового середовища, що складається з факторів загроз (табл. 5.6) та факторів можливостей (табл. 5.6).

Таблиця 5.6.

## Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Збій програмного забезпечення	Наявність нових вірусів, що можуть занести зміни у прошивку ПЗ	Заміна пакету ПЗ
2	Вихід з ладу електричних компонентів, карти пам'яті, внутрішньої пам'яті мікроконтролера	Людський фактор. Брак якості електричних елементів. Обмежена кількість циклів запису – зчитування.	Ремонт за кошти клієнта. Гарантійний ремонт. Продаж нових карт пам'яті.
3	Підвищення вимог до регламентованих показників якості електроенергії	Розвиток сфери енергозабезпечення та енергоефективності	Зміна налаштувань, параметрів роботи аналізатора

Таблиця 5.7.

## Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Якісна оцінка параметрів якості	Правильність побудови схемо технічних та програмних рішень	Залучення
2	Високий економічний ефект	Правильність побудови схемо технічних та програмних рішень	Залучення

Надалі проводиться ступеневий аналіз конкуренції ринку (табл 5.8), що складається з особливостей конкурентного середовища, опису в чому проявляється дана характеристика та визначення впливу на діяльність підприємства.

Таблиця 5.8.

## Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Вказати тип конкуренції - чиста	Якісні показники	Покращення, модернізація.
2. За рівнем конкурентної боротьби - локальний	Належить до локальних мережевих рішень	Збільшення можливостей аналізаторів

Продовження табл. 5.8.

3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Використовується лише в галузях енергозбереження та енергоефективності.	Розширення функціоналу та галузей застосування.
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Відрізняється видом побудови схемотехнічних рішень під поставлені задачі	Збільшення функціональних можливостей приладу
5. За характером конкурентних переваг - цінова / нецінова	Підвищення якості побудови схемо технічних рішень призводить до затрат. Зміна стандартів якості електроенергії	Зниження собівартості та вчасна зміна алгоритму від зміни вимог
6. За інтенсивністю - не марочна	Конкуренція не жорстка	Проведення заходів по розвитку бренду

Наступним етапом після ступеневого аналізу конкуренції на ринку, опису загальних властивостей ринку, є обґрунтування факторів конкурентоспроможності (табл. 5.9), що складається з опису фактора конкурентоспроможності та його обґрунтування з наведенням чинників що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущими. Фактори конкурентоспроможності формуються особливостями запропонованої науково – технічної розробки, що є кращими, в порівнянні з іншими розробками даної теми [35].

Таблиця 5.9.

## Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Можливість аналізу більше 24-години без усереднення вимірювальних даних	Більш точна оцінка параметрів якості через визначення вмісту інтергармонік на всьому проміжку часу аналізування
2	Оцінка економічного ефекту від встановлення компенсатора реактивної потужності, вибраного з врахуванням регламентованих показників якості електроенергії	Достовірна інформація по рентабельності витрат
3	Низька вартість	Відсутність надлишкового функціоналу. Використання персонального комп'ютера для проведення розрахунків.
4	Гнучке програмне забезпечення	Можливість налаштування під особливості індивідуальних мереж, ринку та підприємств
5	Мобільність	Компактність та можливість швидкої заміни карти пам'яті дозволяє проводити послідовний аналіз інших мереж

Наступним етапом є SWOT (матриця аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities)) – аналіз стартап – проекту (табл. 5.10).

Таблиця 5.10.

## SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <p>Низька вартість. Наявність оригінального алгоритму.</p> <p>Можливість тривалого аналізування. Більш точний аналіз на основі вмісту інтергармонік.</p>	<p>Слабкі сторони:</p> <p>Функціонал націлений на вирішення однієї задачі.</p>
<p>Можливості:</p> <p>Економічна вигода від попередньої оцінки економічного ефекту.</p>	<p>Загрози:</p> <p>Поява нових алгоритмів, нових конкурентів.</p>

Після SWOT – аналізу проектів проводять визначення базової стратегії розвитку (табл. 5.11), що визначатиме поведінку компанії на ринку.

Таблиця 5.11.

## Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Ні	Так	Ні	агресивна

Наступним етапом є визначення ключових переваг концепції потенційного товару (табл. 5.12).

Таблиця 5.12.

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Економічна вигода	Оцінка рентабельності перед проведенням ви-трат на компенсатор та його обслуговування	Проведення оцінки економічного ефекту. Вибір компенсатора по індивідуальних особливостях електромережі.

Визначення цінових меж описано у табл. 5.13.

Таблиця 5.13.

Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари- замінники	Рівень цін на товари- аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	Немає	10000/100000	Немає	5000/10000

## Висновки до розділу 5

1. Визначено зміст ідеї, напрямки застосування та вигоду для користувача;



2. Визначено сильні, слабкі та нейтральні характеристики ідеї проекту;
3. Оцінено технологічну здійсненність ідеї проекту;
4. Проведено попередню оцінку характеристики потенційного ранку стартап – проекту;
5. Проведена характеристика потенційних клієнтів стартап – проекту;
6. Оцінено фактори загроз та фактори можливостей;
7. Проведено ступеневий аналіз конкуренції на ринку;
8. Обґрунтовано фактори конкурентоспроможності;
9. Визначено базову стратегію розвитку та ключові переваги концепції потенційного товару;
10. Оцінено межі встановлення цін.

Визначені переваги та недоліки розроблених схемо-технічних та програмних рішень, впливатимуть на можливість виходу на ринок, конкурентоспроможність розробленого аналізатора, цінові особливості. Визначення ключових переваг дозволяє розглянути подальші стратегії розвитку, що можуть бути відмінними від базової.

## ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто актуальність компенсації реактивної енергії, регламентовані показники якості електроенергії та їх вплив на вибір типу компенсатора, типи компенсаторів реактивної потужності, їх структуру. Види навантажень, їх вплив на параметри електроенергії та на вибір типу компенсатора. Обґрунтовано необхідність використання аналізаторів для вибору типу та потужності компенсатора. Проведено огляд аналізаторів якості електроенергії, їх основних функцій, класів. Розглянуто складові потужності. Проведено маркетинговий аналіз перспектив реалізації запропонованих науково – технічних рішень.

Побудовано методику аналізу доцільності компенсації реактивної потужності, на основі визначення економічного ефекту від впровадження компенсатора реактивної потужності з визначеним типом та потужністю в мережу. Особливості вибору типу компенсатора від параметрів якості електричної мережі, для чого побудовано алгоритм вибору параметрів компенсатора. Розроблено схему електричну принципову, на основі якої проєктовано друковану плату та виготовлено дослідний макет.

Використання описаної методики дозволить визначити тип компенсатора, а також розрахувати економічний ефект від даного типу та параметрів компенсатора.

Розроблена система моніторингу параметрів електричної енергії мережі, призначена для вибору типу та потужності компенсатора реактивної потужності з максимальним економічним ефектом. Система складається зі спеціалізованого аналізатора параметрів електричної енергії, основними перевагами якого є компактність, наявність карти пам'яті, що збільшує тривалість моніторингу до одного місяця неперервної роботи. В результаті використання розробленого програмно-апаратного комплексу для трьох типів навантажень: лінійного реактивного, нелінійного реактивного та

динамічного вдалося досягти щорічного економічного ефекту, що склав 104.3% для лінійного, 17.9% для нелінійного і 44.7% для динамічного навантаження від початкової вартості компенсатора.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Power Factor Correction. Power Quality Solutions. Published by Epcos AG. Edition 04/2006. Ordering No. EPC: 26017-7600. Printed in Germany. 79 p.
2. Тонкаль В.Е. Баланс энергии в электрических цепях / [Тонкаль, В.Е., Новосельцев, А.В., Денисюк, С.П. и др.] – Киев: Наукова думка. – 1992. – 312 с.
3. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия и совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 32 с.
4. EN 50160:2010 Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.
5. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності [Текст]. - Київ: Національний стандарт України, 2014. – 32 с.
6. Карпов А. С., Ярошевич В. В., Карпова О. М. Оценка эффективности мониторинговых исследований качества электроэнергии по ГОСТ 13109-97 в высоковольтной сети 6-150 кВ //Труды Кольского научного центра РАН. – 2013. – №. 4 (17).
7. Datasheet                      STM32F103                      Series.                      URL:  
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00161566.pdf>.
8. Датчик переменного тока. – Режим доступа:  
<https://www.olx.ua/obyavlenie/arduino-datchik-peremennogo-toka-100a-sct-013-000-IDgayNM.html>
9. Gheorghe, S., Branescu, V. "Power quality and improvement of the performance in electricity distribution system," CIGRE/IEEE PES International Symposium Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, 2003.

CIGRE/PES 2003., Montreal, Quebec, Canada, 2003, pp. 109-114. – doi: 10.1109/QSEPDS.2003.159805

10. Gawande, S. P., Kubde, N. A., Joshi, M. S. and Sudame, B. S. "Reactive power compensation of wind energy distribution system using Distribution Static Compensator (DSTATCOM)," 2012 IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (IICPE), Delhi, 2012, pp. 1-5. – doi: 10.1109/IICPE.2012.6450410

11. B. S. Joshi, O. P. Mahela and S. R. Ola, "Reactive power flow control using Static VAR Compensator to improve voltage stability in transmission system," 2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), Jaipur, 2016, pp. 1-5. – doi: 10.1109/ICRAIE.2016.7939504

12. Panchbhai, A., Parmar, S. and Prajapati, N. "Shunt active filter for harmonic and reactive power compensation using p-q theory," 2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC), Chennai, 2017, pp. 260-264. – doi: 10.1109/ICPEDC.2017.8081097

13. Mattar, J. R., Strutz, J. C., Hausmann, R., Oliveira, S. V. G. and Péres, A. "A single phase active filter as a harmonic compensator," 2013 Brazilian Power Electronics Conference, Gramado, 2013, pp. 1234-1238. – doi: 10.1109/COBEP.2013.6785273

14. Zhuikov, V.J., Verbytskyi, I.V., Kyselova, A.G. Reactive power compensation approach with dynamic mode of load current. Technical Electrodynamics – 2018, № 4, Pp. 47-52. – doi:10.15407/technd2018.04.047

15. Вербицький, Є. В. Компенсатор реактивної потужності у перехідних режимах / Є. В. Вербицький, Р. М. Прибудько, Д. О. Зінченко, М. О. Мацюк // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 2. – С. 121-125. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.42.

16. Zhuikov, V. J., Verbytskyi, I. V., Bondarenko, O. Features of compensation of a reactive power at the transient mode. IEEE Conferecne Electric Power Networks (EPNet), 2016. p. 1-4. – doi: 10.1109/EPNET.2016.7999362.
17. Miron, A., Chindris, M. and Cziker, A. "Interharmonics analysis using Fourier Transform and virtual instrumentation," 2009 10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Lodz, 2009, pp. 1-4. – doi: 10.1109/EPQU.2009.5318844
18. Repak, M., Otcenasova, A., Regula, M., Boli, A. and Belany, P. "Design of power quality analyzer," 2018 ELEKTRO, Mikulov, 2018, pp. 1-6. – doi: 10.1109/ELEKTRO.2018.8398305
19. Subtirelu, G., Dobriceanu, M. and Linca, M. "Power quality analyzer," 2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, 2017, pp. 909-914. – doi: 10.1109/ATEE.2017.7905043
20. Paranhos, I., Libano, F., Melchiors, J., Mano, O. and Roenick, A. "Power energy meter in a low cost hardware/software," 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, 2007, pp. 1-9. – doi: 10.1109/EPE.2007.4417341
21. Железко Ю. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. – Litres, 2017
22. Овсейчук В. и др. Компенсация реактивной мощности //Новости электротехники. – 2008. – №. 4. – С. 52.
23. Труфанов В. В., Ханаев В. В. Математическое моделирование нагрузок потребителей электроэнергии при оптимизации развития электроэнергетических систем //Электричество. – 2008. – №. 9. – С. 2-9.
24. Шклярский Я. Э., Скамьин А. Н. Способы уменьшения влияния высших гармоник на работу электрооборудования //Записки Горного института. – 2011. – Т. 189.

25. Соломчак О. В., Гладь І. В. Проблеми розрахунку та компенсації реактивної потужності в мережах з несинусоїдним (нелінійним) навантаженням //Енергетика та електрифікація. – 2008. – №. 6. – С. 27-32.

26. Бараненко Т. К., Бараненко Є. В. Методы компенсации реактивной мощности в сетях с нелинейными нагрузками //Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2013. – №. 26.

27. Datasheet EL817 Series. URL:  
<https://elecfreaks.com/estore/download/EF03052-EL817.pdf>.

28. Datasheet BC856B Series. URL:  
[https://assets.nexperia.com/documents/data\\_sheet/BC856\\_BC857\\_BC858.pdf](https://assets.nexperia.com/documents/data_sheet/BC856_BC857_BC858.pdf).

29. Кузнецов К. А., Кондратьев Н. О., Трубин М. В. Первое включение TFT LCD 2.4” с драйвером R61520 под управлением STM32. – 2018

30. Коваленко В.В. и др. Трехмерное моделирование печатной платы на основе CAD DipTrace // Моделирование искусственного интеллекта. - 2014. - №. 3. - С. 3.

31. Соболев Александр Сергеевич Оценка экономической привлекательности инвестиционных проектов на стадии разработки идеи // Вестник ИрГТУ. 2015. №10 (105).

32. Семёнов, Александр Сергеевич, and В. А. Бондарев. "Выбор контрольно-измерительной техники для регистрации показателей качества электроэнергии." Международный студенческий научный вестник 3-4 (2015): 414-416.

33. Статистика смертности и советы по безопасности для стартапов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vc.ru/p/startup-eset>.

34. Тиль, П. От нуля к единице : как создать стартап, который изменит будущее / П. Тиль, Б. Мастерс; перевод с англ. – Москва : Альпина паблишер, 2015. – 188 с.

35. Харниш, В. Правила прибыльных стартапов : как расти и зарабатывать деньги / В. Харниш ; пер. с англ. В. Хозинского. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2012. – 279 с.

36. Прибудько Р.М., Ходаков К.А. Компенсатор реактивной мощности, Київ: XI міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2018», збірник статей, 2018.

37. Вербицький, Є. В. Аналізатор параметрів якості електромережі для вибору типу та потужності компенсатора реактивної потужності / Є. В. Вербицький, К. А. Ходаков // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018.

38. Брагіда М. В., Тримпол Я. О. Розрахунок системи регулювання струму зварювання //Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2013. – №. 184 (1). – С. 187-191.



## ДОДАТОК 1

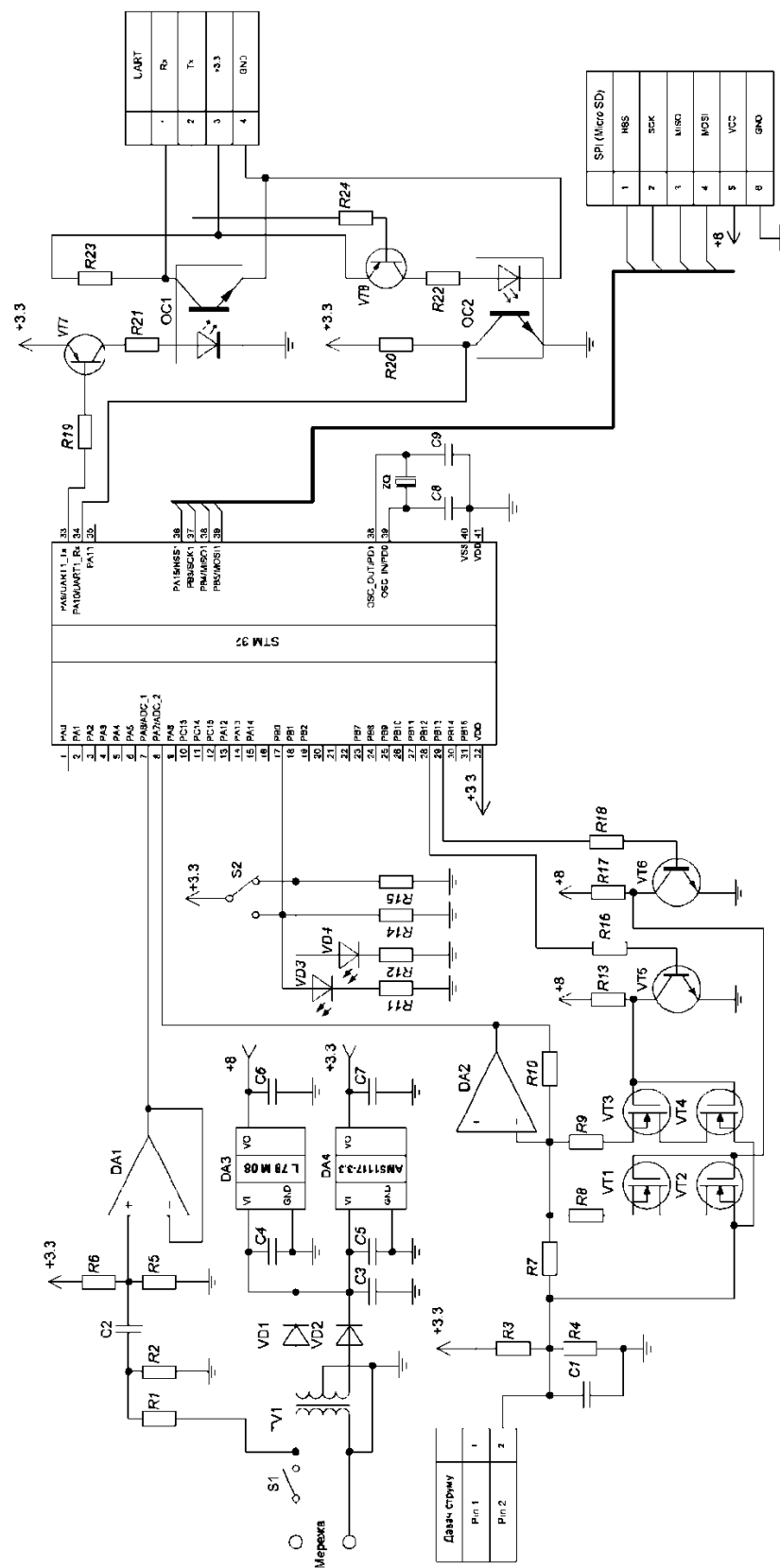


Рис. Д1.1 Схе́ма аналізатора ПЯЕ електрична принципова

## ДОДАТОК 2

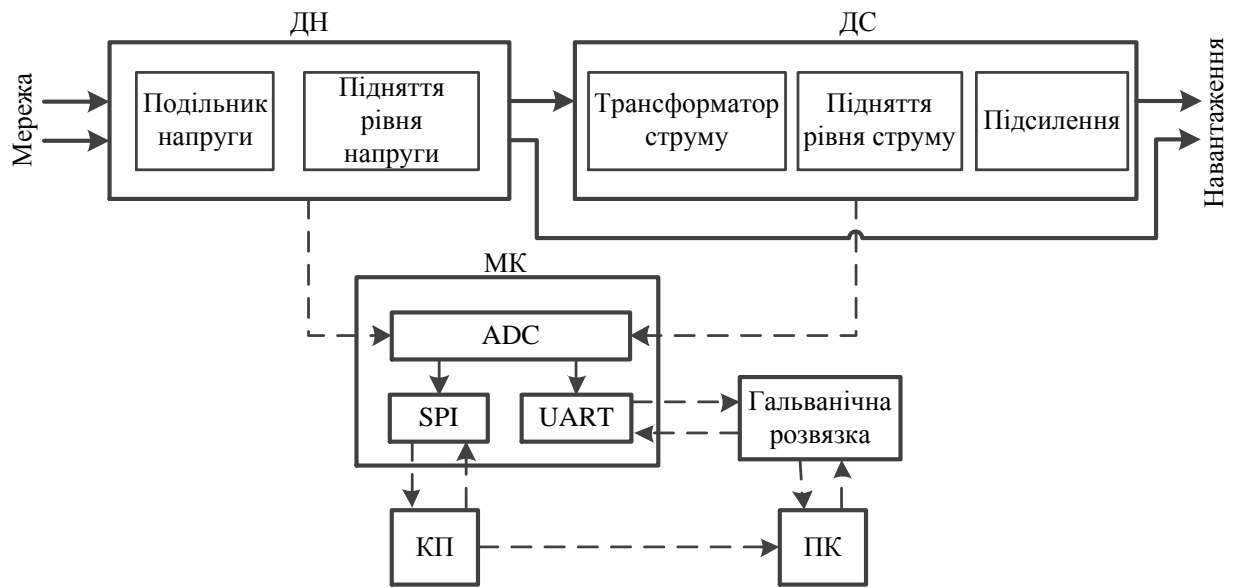


Рис. Д2.1 Структурна схема аналізатора ПЯЕ

## ДОДАТОК 3

### Лістинг програми системи керування:

```
#include "stm32f10x.h"
#include "stm32f10x_gpio.h"
#include "stm32f10x_rcc.h"
#include "misc.h"
#include "main.h"
#include "stm32f10x_spi.h"
#include "ff.h"
#include "stm32f10x_tim.h"
#include "stm32f10x_adc.h"
#include "stm32f10x_usart.h"
#define buff_size 8192 //8192
#define number_of_clusters buff_size/512
#define start_sector 100000
#define start_sector_correct 2048
#define end_sector (30800000+start_sector_correct) //30800000

void led_ini(void);
void adc_ini(void);
void tim4_ini(void);
void nvic_ini(void);
void usart_init(void);
void USARTSend(const unsigned char *pucBuffer, unsigned long ulCount);
void adc_Injected_ini(void);
    BYTE buffer[buff_size];
    BYTE buffer1[buff_size];
bool write_sd=0; //дозвіл запису
uint8_t buff_number=0; // номер буфера
uint8_t k=0;
uint8_t adc;
uint16_t buff_counter=0;           // заповнення буфера
uint16_t buff_sent_counter=0;      //кількість надісланих буферів
UINT sector_counter=start_sector+start_sector_correct; // початковий сектор +
зміщення
UINT max_sector=end_sector;        // кінцевий сектор
uint16_t ADC_Single1,ADC_Single2;
uint32_t ADC_Dual;

int main(void)
```

```

{   SetSysClockTo72();
    SysTick_Config((72000000/100-1)); // переривання кожні 10 мс
    led_ini(); // ініціалізація світлодіода
    for(uint16_t i=0;i<buff_size;i++)
    {   buffer[i]=0x00;
        buffer1[i]=0x00;}
    FRESULT status=16;
    //ініціалізація sd
    GPIO_WriteBit(GPIOB,GPIO_Pin_11,Bit_SET);
    do{   status=disk_initialize(0);
        if(status==0)
        {   GPIO_WriteBit(GPIOB,GPIO_Pin_10,Bit_SET);
            GPIO_WriteBit(GPIOB,GPIO_Pin_11,Bit_RESET);
            break;   }
        }while(status==0);
    status=16;
    adc_Injected_ini();
    tim4_ini();
    nvic_ini();
    while(1)
    {   if (buff_sent_counter>=2200) {
        GPIO_WriteBit(GPIOB,GPIO_Pin_10,Bit_RESET);
        }
        if((write_sd) && (sector_counter<=max_sector))
        {   if(buff_number)
            {   status=disk_write(0,buffer,sector_counter,number_of_clusters);
                sector_counter+=number_of_clusters;
                write_sd=0;
                buff_sent_counter++;
            }
            else
            {
                status=disk_write(0,buffer1,sector_counter,number_of_clusters);
                sector_counter+=number_of_clusters;
                write_sd=0;
                buff_sent_counter++;
            }
        }
    }
}

void SysTick_Handler()
{

```

```

disk_timerproc(); //таймаут
k++;
if(k==5)
    {
        GPIO_WriteBit(GPIOC,GPIO_Pin_13,Bit_SET);
    }
    else{
        if(k==150)
        {
            GPIO_WriteBit(GPIOC,GPIO_Pin_13,Bit_RESET);
            k=0;
        }
    }
}

```

**void TIM4\_IRQHandler(void)**

```

{
    ADC_SoftwareStartInjectedConvCmd ( ADC1 , ENABLE ) ;
    if (TIM_GetITStatus(TIM4, TIM_IT_Update) != RESET)
        // очищаєм біт переривання таймера
        TIM_ClearITPendingBit(TIM4, TIM_IT_Update);
    while(ADC_GetFlagStatus(ADC1, ADC_FLAG_JEOC) == RESET);
    {
        ;
    }
    buffer_former1(ADC_GetInjectedConversionValue(ADC1,
        ADC_InjectedChannel_1),
        ADC_GetInjectedConversionValue(ADC1,
        ADC_InjectedChannel_2));
}
void buffer_former1(uint16_t val_u,uint16_t val_i)
{
    if(buff_number)
    {
        //заповнення буфера
        buffer1[buff_counter]=(uint8_t)(val_u>>4);
        buff_counter++;

        buffer1[buff_counter]=(uint8_t)((val_u&0x00F)<<4)+(uint8_t)(val_i>>8);
        buff_counter++;
        buffer1[buff_counter]=(uint8_t)(val_i&0x0FF);
        buff_counter++;

        if(buff_counter>buff_size-3) //буфер заповнено
        {
            buff_counter=0; //обнуляєм лічильник

```

```

        buff_number=0; //переходим до наступного буфера
        write_sd=1;    //запис дозволено
    }
}

else
{
    //заповнення буфера
    buffer[buff_counter]=(uint8_t)(val_u>>4);
    buff_counter++;

    buffer[buff_counter]=(uint8_t)((val_u&0x00F)<<4)+(uint8_t)(val_i>>8);
    buff_counter++;
    buffer[buff_counter]=(uint8_t)(val_i&0xFF);
    buff_counter++;
    if(buff_counter>buff_size-3) // буфер заповнено
    {
        buff_counter=0;
        buff_number=1;
        write_sd=1;
    }
}
}

```

## ABSTRACT

### 1.1 Electricity Quality Indicators

The reactive power compensator reduces the reactive component of the current flowing through the generator, which reduces the load on the generator, which leads to an implicit improvement of the electrical network parameters. Since in such chains there is an interdependent instant and integral characteristic, all of their energy indices are interrelated by proportional dependencies. This makes it possible to optimize and compensate for other indicators of the system [2]. Therefore, it is advisable to consider these indicators in more detail.

The necessary factor for the normalization of the quality of electric energy is the organization of control over the parameters of the electricity quality parameters (PAYE). The quality of electrical energy is described by the quality parameters, also called electricity quality indicators, which determine the degree of suitability of the electric energy for its intended use. There are standardized indicators of quality of electric energy, the values of which are normalized, according to GOST 13109-97, DSTU EN 50160: 2010, DSTU EN 50160: 2014, the indicators of quality of electric energy are [3,4,5]:

- Rated voltage deviation  $\delta_{Uy}$ ;
- swing of voltage change  $\delta_{Ui}$ ;
- the dose of the flicker  $P_i$ ;
- coefficient of distortion of sinusoidal voltage curve  $K_U$ ;
- coefficient of the  $n$ th harmonic voltage component  $K_{U(n)}$ ;
- Coefficient of voltage unbalance  $K_{2U}$ ;
- frequency deviation  $\Delta f$ ;
- duration of voltage failure  $t_n$ ;
- impulse voltage  $U_{imn}$ ;
- coefficient of temporal over-voltage of  $K_{nepU}$ .

## **1.2 Types of loads and their influence on electricity quality parameters**

The shape of the current and voltage of the network is determined by the nature of the load, which can be divided into [23]:

- linear;
- nonlinear;
- sharp change.

When connected to a linear load network, the current shape consumed by them is proportional to the voltage. Examples of loads can be resistive, capacitive, inductive - linear loads, that is, they do not depend on the value of current, these are incandescent lamps, heaters and others. The form of reactive energy created by this load is constant and determined by the phase shift of the voltage and current [24].

Nonlinear load is a loading current whose consumption is nonsinusoidal under the condition of power from the sinusoidal voltage source (ie, this load generates higher harmonics of current (2, 3, 4, etc.)). The nature and value of the resistance ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ) depends on the current (its value, direction). Examples of such loads are thyristor or diode rectifiers. Modern equipment includes built-in blocks for eliminating harmonic distortions of the consumed current (THD filters), but all the same to some extent, they make distortion in the network. The form of reactive energy generated by this load is inconsistent and is determined not only by the phase shift of the voltage and current, but also by the nonlinearity of current consumption, distortion of shape by higher harmonics [25].

Variable load is the load size and (or) the current consumption pattern of which often varies. Smooth load change can cause electric motors to start with a large starting current. At work of consumers with sharply variable load the energy quality decreases in the form of fluctuations and voltage deviations, and at low



power sources of the power supply - frequency fluctuations. The appearance of voltage fluctuations in power supply systems is negatively reflected in the work of consumers sensitive to them, and first of all, the work of electrical lighting installations. The form of reactive power generated by this load contains a sharply variable character, determined by frequent transients, distortions of form, content of higher and interharmonic [26].

To solve problems of negative impact on the network loads are used compensators reactive power. Which minimize the negative impact on the PAYE network, which is created by linear, nonlinear and sharp-loaded loads. Existing on the market, the compensators differ in their parameters, the type, and the principle of operation. Consider the existing types of compensators, and their features, because the efficiency of the use of the compensator is determined by the correct selection of its parameters, depending on the type and nature of the load [22].

### **1.3 Types of reactive power compensators**

There are the following types of compensators:

1. Static compensators;
2. Active filters;
3. Active filters with dynamic compensation.

Consider each of the types in detail.

Static compensators consist of capacitor banks (C1, C2, C3, fig. 1.1), reactors (L1, L2, L3, Fig. 1.2) with thyristor switches (VS1 ... VS6, Fig. 1.1, Fig. 1.2), DC current sensors, voltage sensors, control systems of the SC. They work most effectively in linear chains, eliminating only the reactive component of the first harmonic. Improve the power factor, reduce the distortion factor, the coefficient of asymmetry, voltage drops [10,11]. This type of compensators is cheaper than others, because it consists only of reactive elements and a small number of semiconductor keys, usually thyristors.

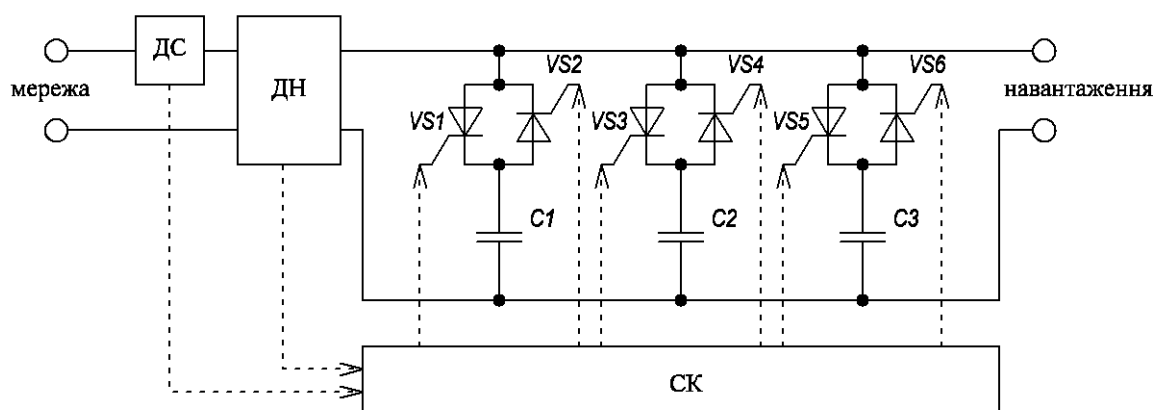


Fig. 1.1 Schematic of capacitive static thyristor compensator.

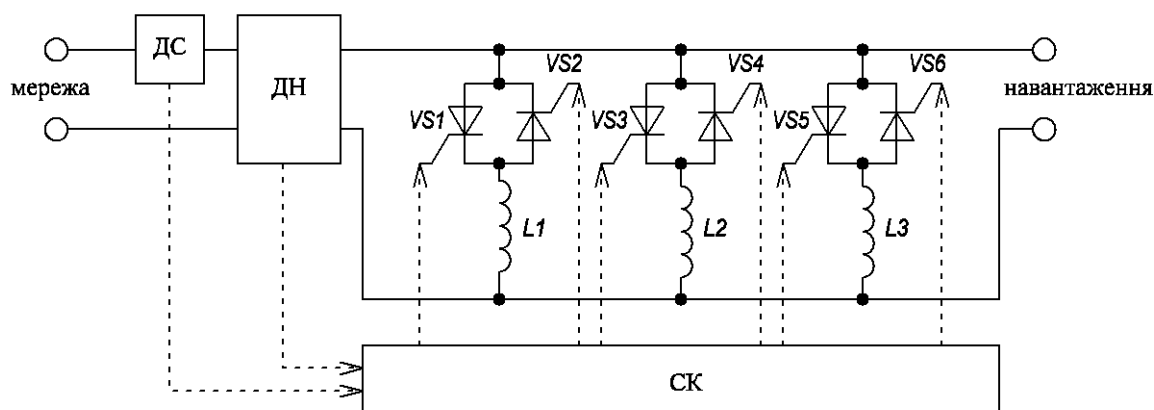


Fig. 1.2 Diagram of an inductive static thyristor compensator.

The active filters (Fig. 1.3) used for nonlinear chains, in addition to the reactive power of the first harmonic, compensate for the power of distortion. Unlike condenser units, the coefficient of harmonic components, the flicker dose, overvoltage, and voltage deviation are also reduced [12,13]. The topologies of such compensators contain a large number of keys (VT1 - VT6, Fig. 1.3), usually IGBT - high cost transistors.

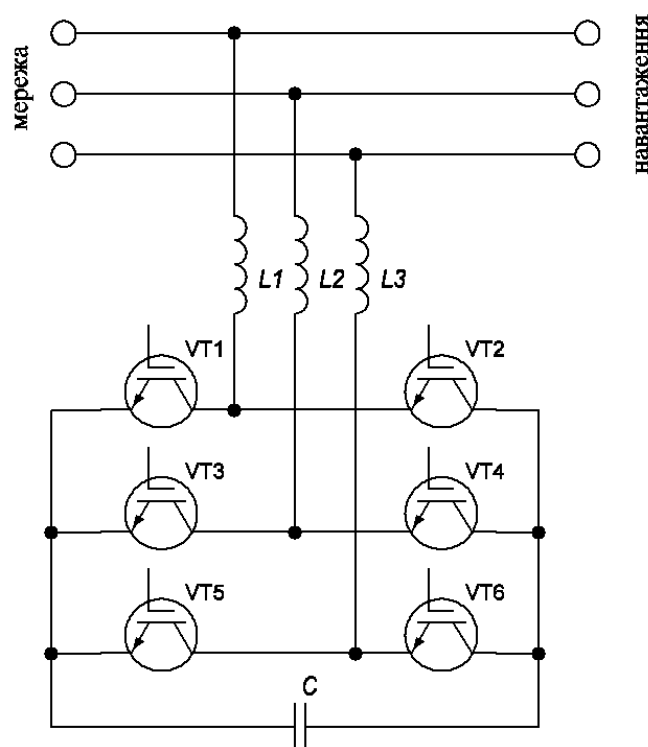


Fig. 1.3 Scheme of a parallel active filter

Active filters with dynamic compensation (Fig. 1.3). In contrast to the previous species, they are even more effective in transient processes. They are better responding to load changes, and are used for sharply varying loads [14-16, 36]. Built on IGBT transistors, but with better dynamic performance and, as a result, even more value.

The calculation of the basic parameters of reactive power compensation devices (type of equipment, its power, frequency adjustment of filter compensating devices, etc.) is a non-trivial task of finding a compromise of technical characteristics and economic parameters.

A simple approach with the use of tables to calculate the power of compensating devices, as well as the use of a standard line of reactive power compensation devices with predetermined capacity, can in fact be applied only by specialists after performing certain calculations. In this case, it is necessary to take into account the existing level of harmonic components available in the network,

the specifics of the load (sharp, linear, nonlinear, asymmetric, and others). Failure to take into account these factors may lead to a non-optimal technical solution and as a consequence to the low economic performance of the project for the implementation of reactive power compensators. Therefore, it is important to use the energy quality parsers for proper selection of parameters and type of compensator [37].

#### **1.4 Review of energy quality parameters analyzers**

The current standard (GOST IEC 61000-4-30-2017) establishes for each measured parameter two classes - A and S, where for each class the measurement methods and corresponding requirements to the quality of functioning are defined [6].

Class A. This class is used if precise measurements are required, for example, when the conditions of contracts that provide for the possibility of resolving disputed issues, checking compliance with standards, etc., are met. Any measurements made by two different means of measurement that meet the requirements of class A, when measuring the same signals, to ensure that the agreed results are obtained from the uncertainty established for the given index [6].

Class S. This class is used for statistical applications such as inspection or assessment of electrical energy quality, possibly with a limited set of indicators. Although the measurement time intervals are the same as class A, the requirements for processing class S are significantly lower. For some surveys, the quality indices of electric energy can be evaluated at various measuring points in the network; other surveys measure the quality of electrical energy at a specific point during a period of time, or in locations inside the building, or even within a single large sample of equipment [6].

Electricity quality analyzers - devices that contain a device for processing the results of measurements of different electrical quantities in order to qualitative

and quantitative analysis of their compliance with applicable norms and requirements. Often, they also contain a device for registering and memorizing violations of regulatory requirements. It is usually combined with devices for measuring electrical quantities, for example, with electricity meters. Also called electroanalyzer.

They are intended for determination of conformity of electric power quality with technical norms, standards and contractual conditions both in cases of one-time inspections and in the case of continuous monitoring. They are also very useful for troubleshooting and trouble shooting in energy distribution systems. For constructive execution, power quality analyzers can be portable and stationary.

The choice of one or another type of analyzer is determined by the range of tasks to be solved. Typical applications of portable analyzers are:

- conducting energy surveys (energy audits);
- drawing up of the energy balance;
- balancing the network through feeders and phases;
- removal of load schedules;
- selection of reactive power compensators;
- control of the functioning of power systems and networks, detection and

correction of malfunctions and violations.

Modern energy quality analyzers, compatible with meters of electrical quantities, operate on the principle of gating or sampling (from English sampling). The current and voltage in the network are measured over short intervals of time multiple times over the network frequency. The number of measurements per period for convenience of further processing is usually one of the whole degree of number 2 and can reach 512 or more. As a result, the input of the analyzer receives an array of data on the instantaneous values of currents and voltages, and their dependence on time. It allows using mathematical algorithms to calculate various paramet They are intended for determination of conformity of electric power quality with technical norms, standards and contractual conditions both in cases of

one-time inspections and in the case of continuous monitoring. They are also very useful for troubleshooting and trouble shooting in energy distribution systems. For constructive execution, power quality analyzers can be portable and stationary.

Electricity quality analyzers record a large number of indicators, first of all - indicators of electricity quality, normalized by current standards. In Ukraine, this is the standard of GOST 13109-97 "Electric energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Standards of quality of electric energy in general power supply systems ". Other countries have other national and international standards. Although the electricity quality metrics, which are standardized by these standards, are essentially the same, the recommended methods and formulas for their calculation may differ significantly. For this reason, power quality analyzers developed for one country may not always be fully applicable in another country.

In addition to the previously listed EE indicators, power quality analyzers usually allow you to identify and a large number of other parameters that allow us to assess the quality of the electrical grids, the optimal distribution of loads, etc.

An important parameter, which is determined by virtually all current energy quality analyzers, is the magnitude of the phase shift between current and voltage. The presence of such a shift indicates the reactive nature of the load in the circuit.

Constant quality control of electricity is a prerequisite for the safe use of electrical equipment, and also directly affects the economic indicators of both producers and consumers of electricity. Despite the fact that the responsibility for compliance with the quality of electricity supplied to consumers is set by the energy supplying organization, consumers themselves are also more affected by the electricity quality in electricity networks. For example, the customer is not detected in time and the reactive nature of the load is not eliminated leads to additional currents in the power grid, resulting in unnecessary voltage drop on them, power allocation (heating), wear of switching equipment, etc. In addition, electricity suppliers usually use economic sanctions in the form of payments for "reactive energy" or for a reduced power factor in this case.

The main manufacturers of electrical energy quality analyzers are:

- Chauvin Arnoux (France);
- Meridian (Ukraine);
- Circutor (Spain);
- Fluke Industrial (USA);
- Sonel (Poland);
- JSC "PrIST" (Russia);
- NPP "Energotekhnika" (Russia);
- LLC "Mar-Energo" (Russia);
- LLC NPP "Proryv" (Russia).
- Features of these devices:
  - Measurement of voltage, current, power, phase shift, power factor and power consumption;
  - Definition of minimum and maximum values of parameters;
  - Length of registration of impressions - 10 days;
  - Economic estimation of energy losses;
  - Measurement of the harmonic (voltage and current) coefficient;
  - Measurement of individual harmonics of voltage and current - from 1 to 25;
  - Advanced analysis of harmonics (spectrum of harmonics, harmonics of power);
  - Oscilloscope function;
  - Registration of failures and emissions;
  - Possibility of integrated assessment of impressions;
  - Data collection in transient processes;
  - Flicker;
  - Synchronize GPS time.